ÉTUDE PRÉLIMINAIRE D'AMPLIFICATION DE PUISSANCE DU LASER PEFL-1500 DANS LE CADRE DU PROJET ALOAS

INO #96-4213-2

105-01842/

RAPPORT FINAL

ÉTUDE PRÉLIMINAIRE D'AMPLIFICATION DE PUISSANCE DU LASER PEFL-1500 DANS LE CADRE DU PROJET ALOAS

INO #96-4213-2

Soumise à:

Centre de recherches pour la défence, Valcartier (CRDV)
2459, boul. Pie-XI nord, C.P. 8800
Courcelette (Québec)
G0A 1R0

Préparée par:

Robert Larose
Responsable de projet INO

Pierre Mathieu
Responsable de projet CRDV

Autorisée par:

Alain Chandonnet
Directeur, Photonique et optique guidée

INSTITUT NATIONAL D'OPTIQUE
369 rue Franquet
Sainte-Foy (Québec) G1P 4N8

Mars 1998

Defence Research and Development Canada | Recherche et développement pour la défense Canada | Canada

[redacted]

TITLE:(U) ETUDE PRELIMINAIRE D'AMPLIFICATION DE PUISSANCE DU LASER PEFL-1500 DANS LE CADRE DU PROJET ALOAS

PERSONAL AUTHOR: Larose, R.; Mathieu, P.
CORPORATE AUTHOR: Defence Research Establishment Valcartier, Valcartier QUE (CAN);Institut National d'Optique, Ste-Foy QUE (CAN)

ABSTRACT: (U) Cette etude preliminaire vis a evaluer au niveau technique les chances de succes d'un projet de developpement de laser a fibre de puissance pour le systeme ALOAS dont le CRDV est le maitre d'oeuvre. Le laser PEFL-1500 de IINO servira d'injecteur dans une fibre amplificatrice de puissance pompee par un laser Ti:saphir de 2 W du CRDV. L'objectif principal de cette etude experimentale est de determiner le niveau de pompage minimal necessaire pour obtenir un gain sature de 15 a 17 dB (impulsion de 30 a 50 mu J pour une injection de 1 mu J) dans une fibre dopee a l'erbium dont les proprietes (concentration, dimensions, ouverture numerique) ont ete optimises. Cette donnee technique essentielle servira par la suite a etablir la viabilite (surtout au niveau du cout de production en volume) d'une source de type MOPA utilisant le PEFL-1500 et un module d'amplification de puissance.

DESCRIPTORS: (U) Fiber optics;Lasers;Light sources;Continuous radiation;Development;Optical equipment;Power amplifiers
IDENTIFIERS: (U) ALOAS (Airborne Laser-based Obstacle Awareness System);Ervium fiber lasers;MOPA (Master Oscillator Power Amplifier)

REPORT NUMBER: DREV-CR-970;INO-96-4213-2; Contractor Report
REPORT DATE: 01 Mar 1998
NUMBER OF PAGES : 56

DRDKIM N°: 98-01890
CANDIS N°: 508741
Format(s): Hardcopy;Document Image stored on Optical Disk

EXECUTIVE SUMMARY

This preliminary study aims at assessing at the technical level the probability of success for the future development of a high power pulsed fiber laser for the ALOAS project. The main objective is to find the range of pump power needed to achieve a saturated gain of 15 to 17 dB in an erbium-doped fiber optimized for high power. This technical data is essential to assess the viability for volume production and estimate the cost of future system. The pulse source used to drive the amplifier was INO's PEFL-1500 with 1μJ output in 10ns pulses at 10kHz.

During the project, 4 different types of fiber were tested with up to 1.5W of pump power at 980nm to establish highest energy per pulse, ease of injection and output beam profile. Energies from 22 to 39μJ were obtained with the fibers. From the measured coupling efficiency, the in-fiber power needed to achieve 20-30μJ was found to be in the range of 600-900mW.

Following the experiments, two elements required further investigation to fulfil the main objective. First, the presence of a small pedestal (part of the input pulse) found to grow from less than 3% of the total pulse energy to 15% after the power amplification stage, was considered unacceptable for the intended application. Second, the coupling efficiency from off-the-shelf pumping diode to any of the four fibers had to be estimated before further prototyping of the fiber laser.

A second phase was then proposed and completed to address those two previous elements. During that second phase of the project, the pedestal was reduced significantly by two different methods. The final method will depend on the impact of the remaining pedestal on the detection system. As for coupling efficiency, it was found that 450-650mW can be coupled in the 30μm fiber. Following the previous evaluation of 600-900mW for pumping, a two pump configuration is needed to meet the requirements.

In conclusion, a 20-30μJ fiber laser source can be made using the right fiber type, pumped by reliable commercially available pump diode pigtailed with INO's lensed-fiber method.

1. TABLE DES MATIÈRES

1. TABLE DES MATIÈRES 2

2. INTRODUCTION 5

3. REVUE DE LITTÉRATURE 5

3.1 LASER Q-SWITCHED 5
3.2 CHAÎNE D'AMPLIFICATION 5
3.2.1 Amplificateurs commutés (Gated-Pulse amplification) 6
3.2.2 Amplification par allongement puis compression (Chirped Pulse Amplification) 6
3.2.3 Amplificateur avec isolation et filtration 6
3.3 CHOIX DU DIAMÈTRE DES FIBRES 6
3.4 EFFET DE L'AMPLIFICATION SUR LA FORME DE L'IMPULSION 8
3.5 EFFETS NON-LINÉAIRES 10
3.6 APPROCHE UTILISÉE POUR CE PROJET 10

4. DESCRIPTION DU MONTAGE 10

4.1 MATÉRIEL 11
4.2 MESURES PROPRES AU MONTAGE 12
4.2.1 Mesure du signal 12
4.2.2 Mesure de la pompe 14
4.2.3 Mesure du laser PEFL 15
4.3 DESCRIPTION DES FIBRES 18

5. RÉSULTATS 19

5.1 FIBRE 530A3 (Ø=10µM) 19
5.1.1 Efficacité d'injection 20
5.1.2 Énergie en fonction de la longueur 20
5.1.3 Données à la longueur optimale 20
5.2 FIBRE 530C1 (Ø=15µM) 21
5.2.1 Efficacité d'injection 21
5.2.2 Énergie en fonction de la longueur 21
5.2.3 Données à la longueur optimale 22
5.2.4 Effet du mélangeur de modes 22
5.3 FIBRE 530C3 (Ø=20µM) 22
5.3.1 Efficacité d'injection 22
5.3.2 Énergie en fonction de la longueur 23
5.3.3 Données à la longueur optimale 23
5.3.4 Effet du mélangeur de modes 23
5.3.5 Polarisation du signal 24
5.3.6 Effet d'une faible amplification sur la forme temporelle 24
5.3.7 Effet d'une forte amplification sur la forme temporelle 25
5.3.8 Effet de l'amplificateur sur le temps de montée 27
5.4 FIBRE 533E2 (Ø=30µM) 27
5.4.1 Efficacité d'injection 27
5.4.2 Énergie en fonction de la longueur 28
5.4.3 Données à la longueur optimale 28
5.4.4 Forme de l'impulsion après amplification 29
5.4.5 Effet du mélangeur de modes 30

5.4.6 Profil spatial du faisceau de sortie *31*
5.4.7 Polarisation du signal *35*

6. ÉVOLUTION DE LA FORME TEMPORELLE DE L'IMPULSION SUIVANT LES FIBRES **35**

6.1 EFFET DU GAIN SUR LA FORME DE L'IMPULSION 36
6.2 FORME TEMPORELLE D'IMPULSIONS LONGUES APRÈS AMPLIFICATION 37
6.3 FORME TEMPORELLE EN FONCTION DU TYPE DE FIBRE 39

7. CONCLUSION **41**

8. RECOMMANDATIONS **42**

8.1 ASPECTS CRITIQUES 42
8.2 INJECTION DANS LA FIBRE 42
8.2.1 Modélisation: *43*
8.2.2 Résultats *46*
8.2.3 Conclusion sur le couplage *46*
8.3 RÉDUCTION DU PIÉDESTAL 47
8.4 VÉRIFICATIONS SECONDAIRES 49

9. BIBLIOGRAPHIE **50**

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Simulation de la forme temporelle à la sortie (fibre 530A3) 9
Figure 2 : Simulation de la forme temporelle à la sortie (fibre 533E2) 9
Figure 3 : Montage expérimental 10
Figure 4 : Filtrage de l'ASE par réseau de Bragg 11
Figure 5 : Correction de l'ILX pour un signal pulsé 13
Figure 6 : Section de détection du montage 14
Figure 7 : Forme de l'impulsion du PEFL-1500 15
Figure 8 : Énergie par impulsion en fonction du taux de répétition 16
Figure 9 : Puissance moyenne du PEFL en fonction du taux de répétition 17
Figure 10 : Croissance de l'ASE entre deux impulsions 18
Figure 11 : Énergie en sortie pour fibre 530A3 20
Figure 12 : Énergie en sortie pour fibre 530C1 21
Figure 13 : Énergie en sortie pour fibre 530C3 23
Figure 14 : Forme temporelle de l'impulsion après faible amplification 24
Figure 15 : Forme du piédestal après faible amplification 25
Figure 16 : Forme temporelle de l'impulsion fortement amplifiée 26
Figure 17 : Piédestal de l'impulsion fortement amplifiée 26
Figure 18 : Énergie en sortie pour fibre 533E2 28
Figure 19 : Forme de l'impulsion après amplification (fibre 533E2) 29
Figure 20 : Piédestal après amplification (fibre 533E2) 29
Figure 21 : Profil spatial du signal sans mélangeur de mode 30
Figure 22 : Profil spatial du signal avec mélangeur 31
Figure 23 : Profil du signal amplifié 32
Figure 24 : Profil de l'émission spontanée 33
Figure 25 : Profil signal avec nouvelle clive 34
Figure 26 : Profil ASE avec nouvelle clive 34
Figure 27 : Forme temporelle de l'impulsion initiale 35
Figure 28 : Forme temporelle après faible amplification (fibre 530A3) 36
Figure 29 : Forme temporelle après forte amplification (fibre 530A3) 37
Figure 30 : Forme temporelle de l'impulsion de 19ns (fibre 530A3) 38
Figure 31 : Forme temporelle de l'impulsion de 43ns (fibre 530A3) 38
Figure 32 : Forme temporelle après amplification (fibre 530C3) 39
Figure 33 : Forme temporelle après amplification (fibre 533E2) 40
Figure 34: Fibre lentillée 43
Figure 35: Profil spatial de la diode laser 44
Figure 36: Tracé des rayons (axe rapide) 45
Figure 37: Tracé des rayons (axe lent) 45
Figure 38 : Effet de l'électronique sur la forme du piédestal 47
Figure 39 : Réduction du piédestal en modifiant la cavité optique 48

2. INTRODUCTION

Cette étude préliminaire vise à évaluer au niveau technique les chances de succès d'un projet de développement de laser à fibre de puissance pour le système ALOAS dont le CRDV est le maître d'oeuvre. Le laser PEFL-1500 de l'INO servira d'injecteur dans une fibre amplificatrice de puissance pompée par un laser Ti:saphir de 2 W du CRDV. L'objectif principal de cette étude expérimentale est de déterminer le niveau de pompage minimal nécessaire pour obtenir un gain saturé de 15 à 17 dB (impulsion de 30 à 50μJ pour une injection de 1μJ) dans une fibre dopée à l'erbium dont les propriétés (concentration, dimensions, ouverture numérique) ont été optimisés. Cette donnée technique essentielle servira par la suite à établir la viabilité (surtout au niveau du coût de production en volume) d'une source de type MOPA utilisant le PEFL-1500 et un module d'amplification de puissance.

3. REVUE DE LITTÉRATURE

La génération d'impulsions intenses se fait selon deux méthodes: de façon interne aux lasers Q-switched[1-2] [5-10][17] ou par chaîne d'amplification externe[3] [11] à partir d'une source d'impulsions de faible énergie. Il y a deux paramètres importants à considérer pour amplifier fortement les impulsions à un taux de répétition élevé: pomper suffisamment la fibre pour atteindre la saturation voulue et emmagasiner l'énergie mais aussi limiter l'effet de l'auto-saturation du gain par l'émission spontanée.

3.1 Laser Q-Switched

Le problème est l'interdépendance entre la durée de l'impulsion et le taux de répétition, en plus, la longueur d'onde d'émission varie également. De plus, la synchronisation externe est difficile car le temps de construction de l'impulsion varie en fonction du pompage et du taux de répétition. Aussi, la forme temporelle de l'impulsion peut présenter des pics d'oscillations dus à la présente de quelques modes qui interfèrent de façon destructive.

3.2 Chaîne d'amplification

Cette technique est intéressante car elle sépare la génération d'impulsion (taux et largeur) de l'amplification de puissance. En général, un laser semi-conducteur de type DFB est le signal source pour la cascade d'amplificateur. Parmi les avantages, on dénote la longueur d'onde connue et fixe, le taux de répétition élevé et des impulsions courtes (100ps). Aussi, selon le type de laser, l'impulsion présente un

glissement en fréquence (chirp) qui est le plus souvent nuisible, mais utile pour l'amplification par compression(3.2.2).

3.2.1 Amplificateurs commutés (Gated-Pulse amplification)

Les meilleures expériences d'amplification utilisent cette technique [2][10][12]. La source est une diode de faible puissance qui passe par une chaîne d'amplificateurs. On utilise ici le fait que l'on amplifie une impulsion pour isoler les différentes sections de gain et les mettre en contact seulement le temps du passage de l'impulsion. L'émission spontanée, autant en co-propagation qu'en contre-propagation, ne circule pas dans les amplificateurs. Le commutateur fait office ici d'isolateur bi-directionnel. En général, un modulateur acousto-optique est employé et le faisceau est en propagation libre entre les amplificateurs ce qui implique d'avoir à ré-injecter le signal à chaque amplificateur. Le cas le plus complexe utilise deux portes acousto-optiques ainsi qu'un filtre externe de 1nm [10].

3.2.2 Amplification par allongement puis compression (Chirped Pulse Amplification)

Ce type d'amplification utilise la présence d'une glissement de fréquence optique pour élargir une impulsion courte de 100ps à plusieurs nanosecondes pour ensuite l'injecter dans un amplificateur. L'amplificateur voit une puissance crête faible en régime quasi-continu. À la sortie, un autre réseau compresse l'impulsion amplifiée pour lui redonner la largeur et la puissance crête voulue[3][13]

3.2.3 Amplificateur avec isolation et filtration

C'est un montage simple qui cascade des amplificateurs avec de plus en plus de puissance de saturation en utilisant seulement des isolateurs et des filtres optiques étroits pour séparer les étages[14]. L'émission spontanée se propageant avec le signal se trouve amplifiée d'où l'utilité du filtre qui limite le gain de la chaîne d'amplificateurs tout en bloquant l'ASE en contre-propagation.

3.3 Choix du diamètre des fibres

Pour les taux de répétition élevés, il est courant de considérer le signal comme étant pratiquement continu comparativement au temps de vie de l'erbium (10ms). L'optimisation de la fibre suit alors les mêmes critères que le cas d'amplificateur standard. Comme considération générale, le pompage en contre-propagation donne de meilleurs résultats car le maximum de signal se trouve à l'endroit du maximum de la pompe. L'optimisation du cas continu montre que l'efficacité augmente avec l'ouverture numérique et le confinement de l'erbium dans une fraction du diamètre du coeur. Cependant, pour des puissances de pompe importantes (>100mW), cette

distinction disparaît pratiquement de même que l'effet du confinement de l'erbium dans le coeur[15].

Le taux de répétition visé dans cette étude est de 10kHz pour tenir compte du balayage spatial qui sera effectué dans l'application ALOAS. La mesure de l'amplificateur à l'erbium en fonction de la fréquence montre de la diaphonie jusqu'à 100kHz. Donc pour la fréquence visée d'utilisation, l'approximation d'un signal continu n'est pas totalement réaliste. Un groupe a justement étudié l'effet de la géométrie de la fibre sur l'extraction de puissance pour des faibles taux de répétition[1]. Cet article est un peu à l'autre extrême du cas continu car il considère que l'inversion de population a pleinement le temps de revenir à un état stationnaire avant la prochaine impulsion. Nos mesures expérimentales de la croissance de l'ASE entre les impulsions (voir Figure 10) confirme que cette approximation est valable pour cette étude et que les conclusions de l'article sont applicables à ALOAS. Pour une fibre typique, la densité d'énergie disponible à la saturation est d'environ 0.11μJ/μm^2 en fonction des sections efficaces d'absorption et d'émission;

$$U_{sat}(\upsilon) = \frac{h\upsilon}{\sigma_a(\upsilon) + \sigma_e(\upsilon)} \qquad \textbf{Équation 1}$$

Par exemple, pour la fibre utilisé dans le PEFL-1500, le U_{sat} se situe aux environs de 4.2μJ. Comme l'extraction d'énergie dépend de la surface active, on comprend pourquoi l'effet du confinement de l'erbium et des hautes ouverture numériques (donc petit cœur) n'apportent rien à l'amplificateur de puissance.

Si on augmente la surface, le comportement de l'amplificateur pour des faibles signaux devient moins bon (efficacité de gain dB/mW, figure de bruit) mais on cherche ici à réaliser un amplificateur en saturation. Pour obtenir plus de surface, on peut réduire l'ouverture numérique et ainsi avoir un diamètre de mode de 10 à 15 microns soit une surface de 250 à 300 μm^2 pour une énergie U_{sat} de 30 μJ (6 fois plus grande). Cette fibre s'avère intéressante car le signal est implicitement monomode en raison de la faible ouverture numérique, mais l'injection de la pompe s'en trouve compliquée d'autant.

Une façon d'introduire plus de puissance de pompe est d'utiliser une fibre multimode avec un diamètre de mode équivalent plus grand. Des fibres de 10 (monomode), 15, 20 et 30μm seront considérées, et les énergies à la saturation sont approximativement :

Diamètre (µm)	Surface de modale (μm^2)	Énergie U_{sat} (µJ)
10	80	9
15	180	19
20	300	34
30	700	81

Cependant, plus le cœur est grand, plus le profil modal est variable à la sortie de la fibre.

3.4 Effet de l'amplification sur la forme de l'impulsion

En plus, le front montant de l'impulsion s'accapare d'une bonne partie du gain et tend à rendre l'impulsion plus courte [10]. L'analyse de Frantz-Nodvik nous permet de voir l'effet de U_{sat} et du gain initial à faible signal G_0 sur la forme de l'impulsion de sortie [16].

$$I_{out}(t) = I_{in}(t) \cdot G(t) \qquad \textbf{Équation 2}$$

$$G(t) = \frac{G_0}{G_0 - (G_0 - 1) \cdot e^{-\frac{\int_0^t I_{in}(t)dt}{U_{sat}}}} \qquad \textbf{Équation 3}$$

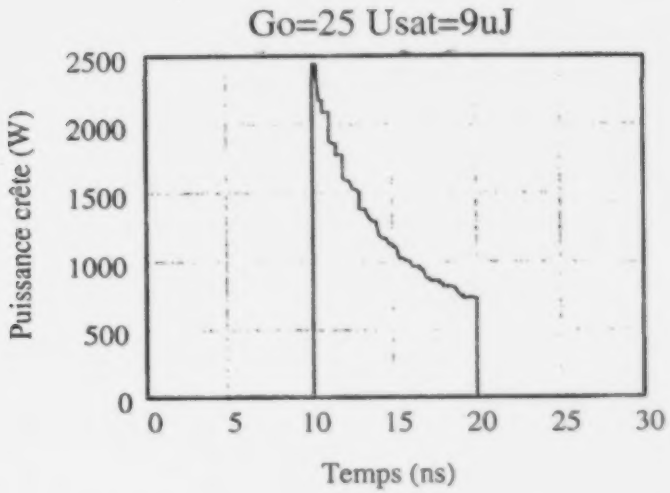

Figure 1 : Simulation de la forme temporelle à la sortie (fibre 530A3)

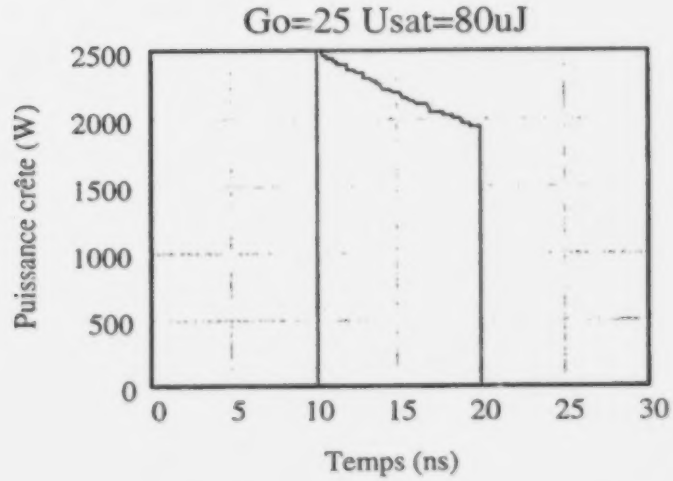

Figure 2 : Simulation de la forme temporelle à la sortie (fibre 533E2)

On remarque que pour le même gain, l'énergie de saturation de la fibre fortement multimode fait que l'impulsion est moins déformée temporellement . On s'attend que la déformation sera plus prononcée pour les fibres de faible diamètre mais leur meilleur gain G_o pourrait compenser.

3.5 Effets non-linéaires

Un problème survient à cause de la puissance crête atteinte lors de la déformation de l'impulsion (section 3.4). Même pour de courte section de fibre dopée, l'effet Raman apparaît en fonction de la valeur crête et provoque un transfert d'énergie à une différence de fréquence d'environ 12 THz dans la fibre optique[11]. Deux groupes [10] [12] ont observé l'effet dans leur système. On produit alors une bande de fréquence dans la plage de 1625nm à 1675nm. Une fraction importante de l'énergie de l'impulsion peut se retrouver dans cette région spectrale et réduire ainsi la sensibilité de la détection. En effet, la réponse des détecteurs InGaAs est marginale dans cette plage de longueur d'onde et celle du Ge est pratiquement nulle.

3.6 Approche utilisée pour ce projet

La génération d'impulsion intense par une chaîne d'amplification offre l'avantage de séparer la production de l'impulsion (largeur, taux de répétition, longueur d'onde) de l'amplification. Pour ce projet, le signal source provient d'un laser pulsé PEFL-1500 qui fournit déjà entre 1.0 et 1.5μJ. Le gain visé en saturation doit être de l'ordre de 14 à 17dB.

4. DESCRIPTION DU MONTAGE

La source d'injection variant en durée est un laser à fibre PEFL-1500 de l'INO de 1.5 μJ à 10 kHz pour une impulsion entre 9 et 10ns. L'amplificateur de puissance est pompé en contre-propagation par un laser Ti-saphir de 2 W.

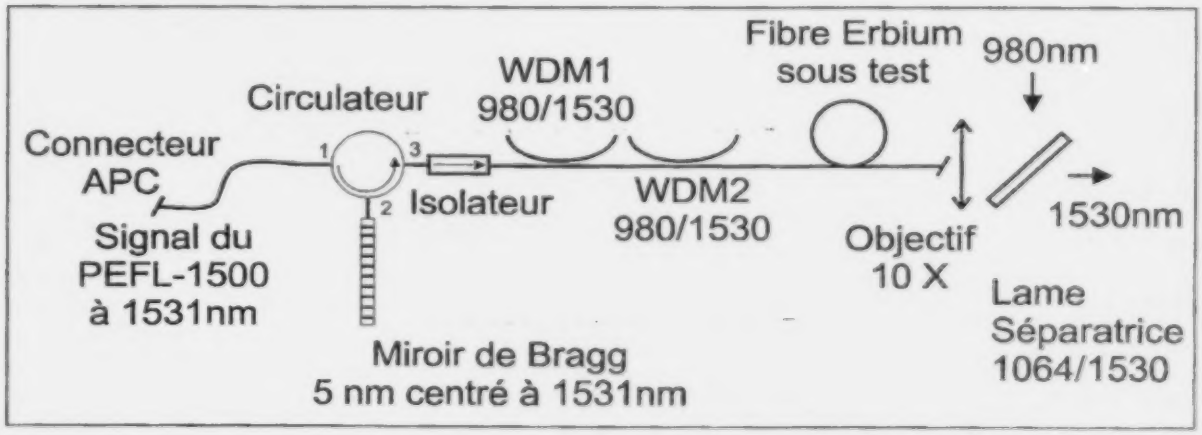

Figure 3 : Montage expérimental

Le laser PEFL-1500 passe d'abord par un circulateur optique fibré. Le signal entre par le port 1 du circulateur et se retrouve au port 2 où il est filtré et réfléchi par le réseau de Bragg (Figure 4). Le signal passe alors au port 3 pour être injecté dans l'isolateur. Cet isolateur sert uniquement de protection au circulateur pour cette expérience, en raison des conditions inconnues du niveau de signal réfléchi et du prix élevé du circulateur. Ensuite, deux coupleurs dichroïques 980/1530nm éliminent la puissance de pompe résiduelle incidente sur l'isolateur. Le signal incident à la fibre sous test provient d'une fibre monomode. Comme les deux fibres sont centrées et fusionnées, l'injection est alors pratiquement monomode, même pour les fibres dopées multimodes. Le signal pompe à 980nm passe par la lame séparatrice pour être injecté dans la fibre à travers l'objectif de 10X. Le signal de sortie à 1530nm passe à travers la lame séparatrice vers les différents détecteurs.

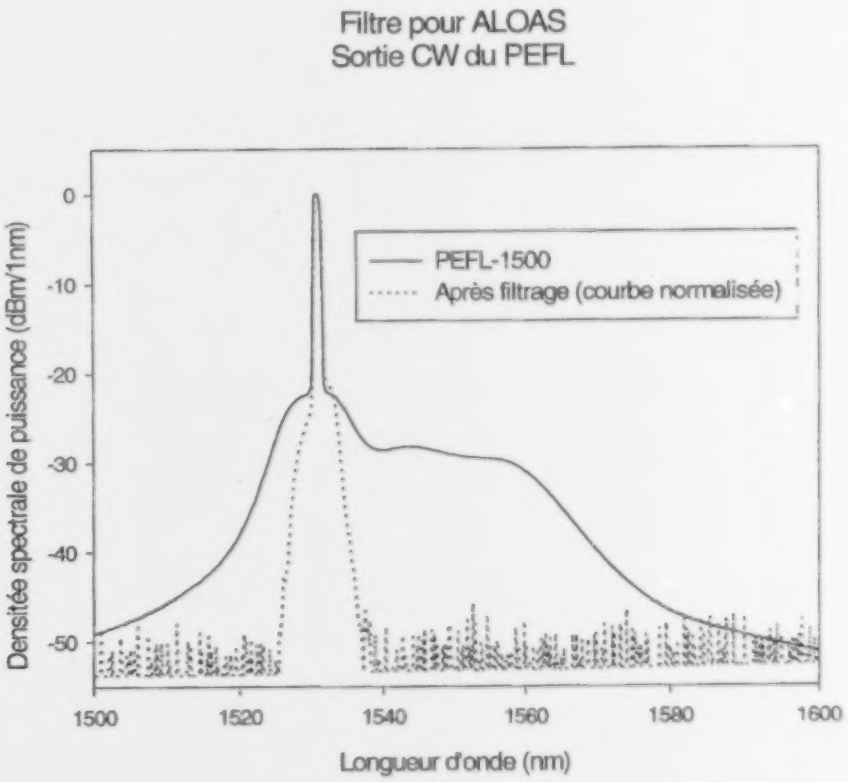

Figure 4 : Filtrage de l'ASE par réseau de Bragg

4.1 Matériel

- Joulemètre Molectron J3-09 (calibré 1.26mV/μJ)
- Détecteur PIN InGaAs ET 3000 Electro-Optics Technology (risetime < 500 ps)
- Puissancemètre ILX avec tête InGaAs (calibrée)
- Puissancemètre thermique Coherent (Thermopile)
- Filtre Si avec anti-reflet pour couper le 980nm résiduel
- Laser PEFL-1500 s/n 96-4102-01
- Mode scrambler Newport FM-1
- Outil de clivage York FK11 avec option de clive à angle

4.2 Mesures propres au montage

Cette partie regroupe les mesures de transmission des éléments optiques, la réponse des détecteurs ainsi que des mesures de la source PEFL.

4.2.1 Mesure du signal

Comme le signal de sortie à 1530nm passe à travers une lame séparatrice 1064/1530nm et un filtre au silicium, il faut corriger la valeur réelle en fonction de la mesure de la transmission de ces éléments. De plus, le puissancemètre ILX affiche une valeur décorrélée en régime pulsé.

4.2.1.1 Correction du détecteur

Le détecteur ILX avec un signal pulsé à 10 kHz sous-estime la valeur de la puissance comparativement à un détecteur thermique. Cependant, les deux détecteurs donnent des valeurs identiques lors de la mesure de l'émission spontanée (signal continu). L'erreur de l'ILX suit une droite et les données de puissance pour les fibres sont corrigées à l'aide de l'équation du lissage (Figure 5).

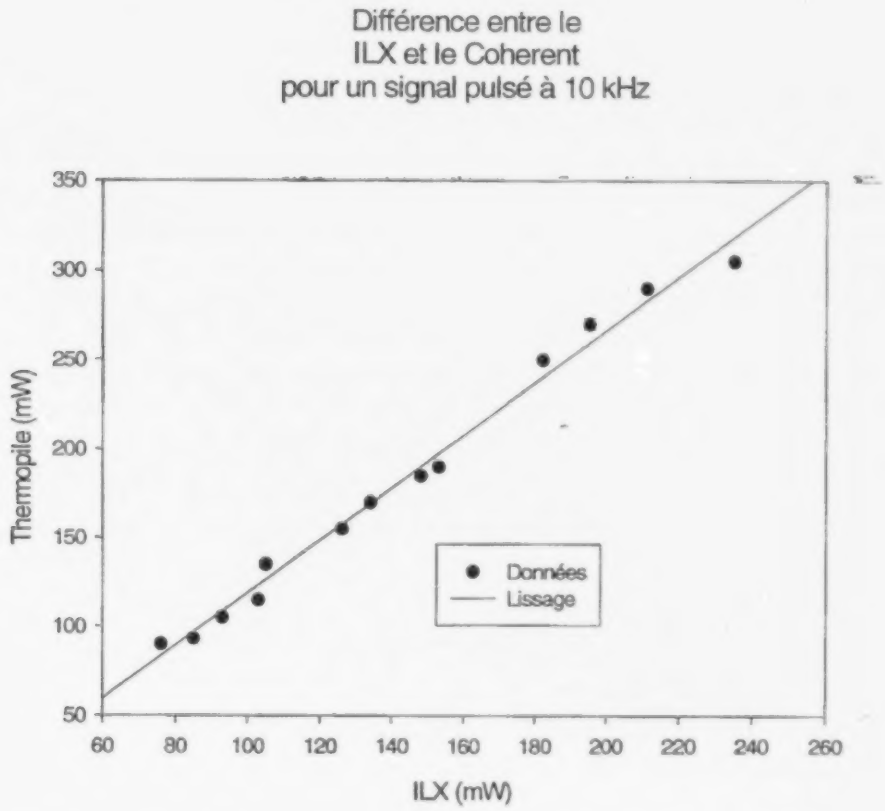

Figure 5 : Correction de l'ILX pour un signal pulsé

4.2.1.2 Mesure avec le joulemètre Molectron

La réponse du joulemètre présente une légère oscillation de stabilisation. Toutes les mesures citées dans ce rapport sont basées sur la valeur crête. Si on considère la valeur moyenne de l'oscillation, on obtient une valeur d'énergie de l'ordre de 9% inférieure. Cette oscillation provient du fait que la surface du détecteur n'était pas illuminée en entier donc chauffée localement. La diffusion subséquente de la chaleur provoque alors une oscillation.

4.2.1.3 Transmission de l'optique à 1530nm

Le montage de détection est illustré à la Figure 6. Le filtre Si sert à couper la pompe résiduelle vers les détecteurs. Le laser PEFL sert de source et il n'y a pas de pompage de la fibre dopée.

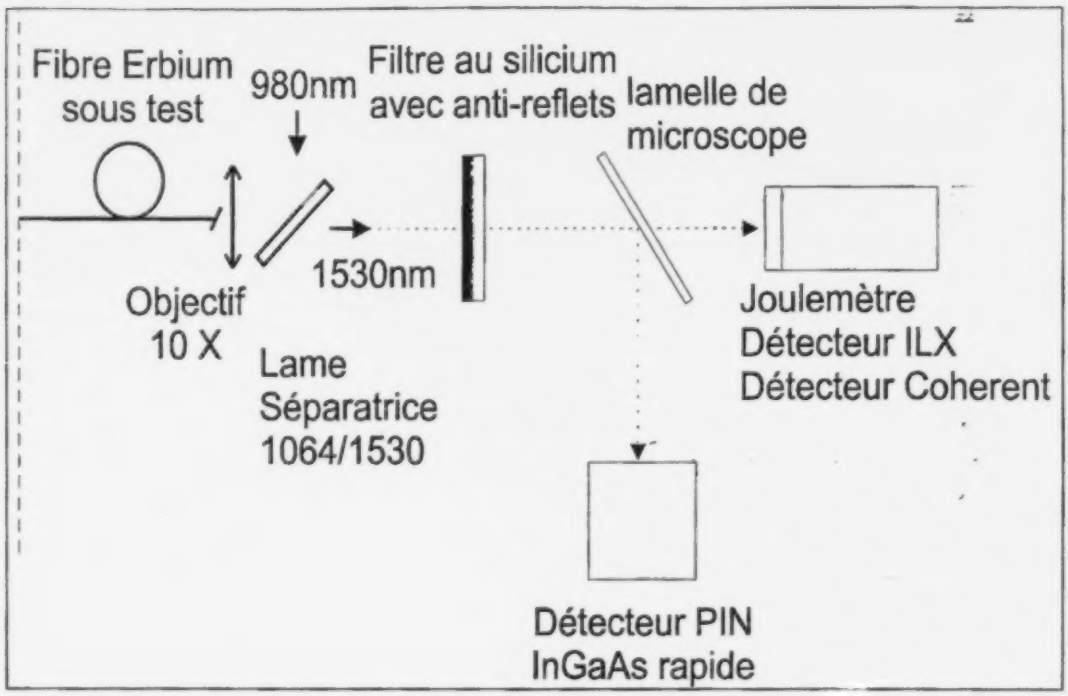

Figure 6 : Section de détection du montage

Sortie fibre	Après lame	Après filtre Si	Après lamelle
960µW	869µW	778µW	719µW

La puissance réelle directement à la sortie de la fibre à 1530nm est de 1.335 fois celle mesurée à l'emplacement du joulemètre. Les pertes se répartissent comme suit : 0.4dB pour la lame 1064/1530nm et l'objectif, 0.48dB pour le filtre au silicium et 0.34dB (deux fois 4%) pour la lamelle d'échantillonnage. Pour la mesure de la puissance moyenne, le facteur de correction est de 1.234 fois la valeur lue.

4.2.2 Mesure de la pompe

La pompe lors de l'expérience est mesurée à la sortie du laser. Pour se rendre à la fibre, la pompe est réfléchie par la lame séparatrice puis focalisée par l'objectif de microscope en vue de l'injection dans l'amplificateur. Pour caractériser l'effet de la lame, les puissances avant et après la lame ont été notées.

Laser (W)	Après lame séparatrice (W)	Transmission
1.03	.910	88.4%

Pour la pompe, les pertes dues à l'objectif ne sont pas comptabilisées (elles peuvent être de l'ordre de 15% selon le nombre de surfaces et des anti-reflets) et l'efficacité d'injection réelle pourrait être supérieure à celle qui sera calculée.

4.2.3 Mesure du laser PEFL

De par sa construction interne, le laser PEFL-1500 utilisé produit une impulsion de 9.5ns avec un léger piédestal avant l'impulsion (Figure 7).

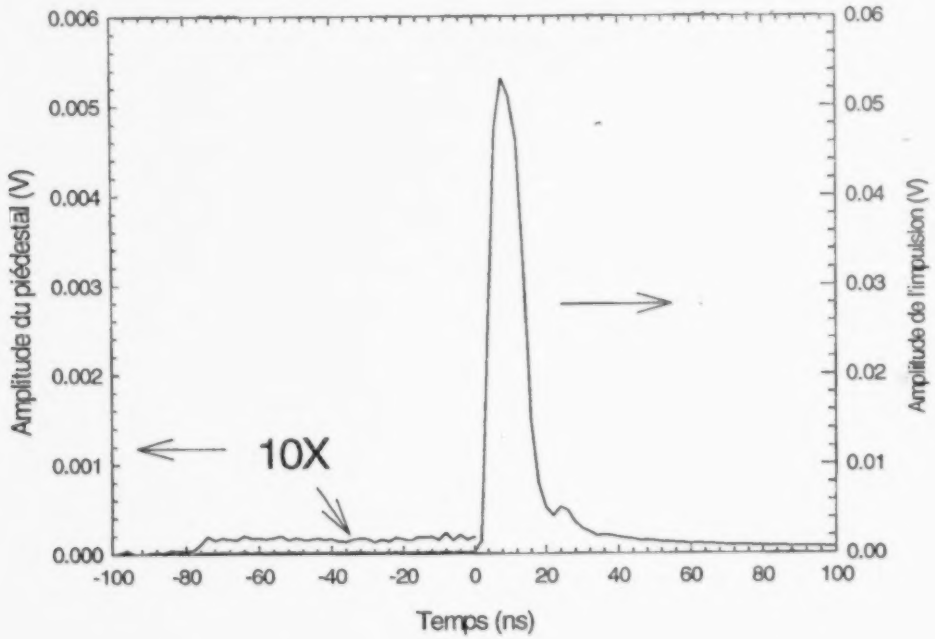

Figure 7 : Forme de l'impulsion du PEFL-1500

Ce piédestal présente le même contenu spectral que l'impulsion. En vue d'évaluer la proportion du signal dans le pied et sous l'impulsion, l'intégrale du signal par section, a été calculée à l'oscilloscope. La petite bosse après l'impulsion provient d'un écho dans le cable BNC entre le détecteur et l'oscilloscope. Le piédestal s'étend environ sur 80ns et 3% de l'énergie s'y trouve. Par une modification de l'électronique de génération de l'impulsion à l'intérieur du PEFL, la durée pourrait être ramenée à la durée de l'impulsion avec moins de 1% de l'énergie totale. Une modification de la longueur de l'optique interne pourrait aussi réduire la durée du piédestal.

Position	Pied	Total
Intégrale	0.132nV•sec	4.45nV•sec

En terme de puissance crête, on mesure 150W pour l'impulsion et 0.5W pour le piédestal. Pour l'expérience d'ALOAS, le taux de répétition a été fixé à 10kHz. Le laser PEFL fournit alors 1.5 µJ d'énergie. La variation de l'énergie et de la puissance moyenne sont représentées dans les deux graphiques suivants (Figure 8 et Figure 9 respectivement).

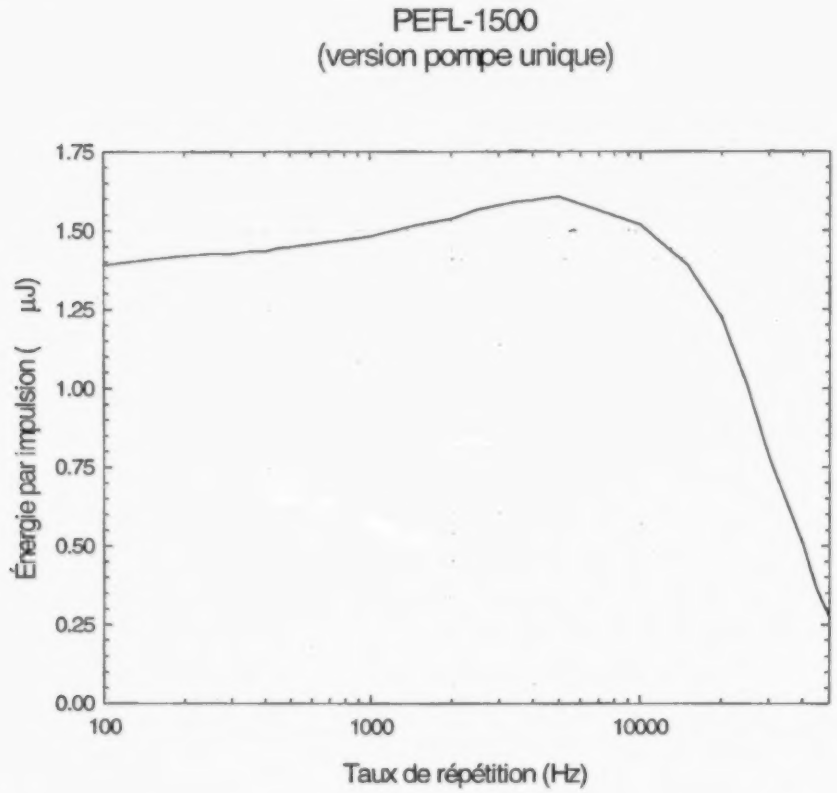

Figure 8 : Énergie par impulsion en fonction du taux de répétition

Un circuit de limitation du courant de pompe en fonction du taux de répétition a été ajouté pour maintenir une énergie par impulsion constante pour les fréquences inférieures à 10kHz. Cela permet d'employer le laser comme transmetteur avec une énergie par bit constante et en plus, l'optique de sortie est protégée contre les impulsions géantes.

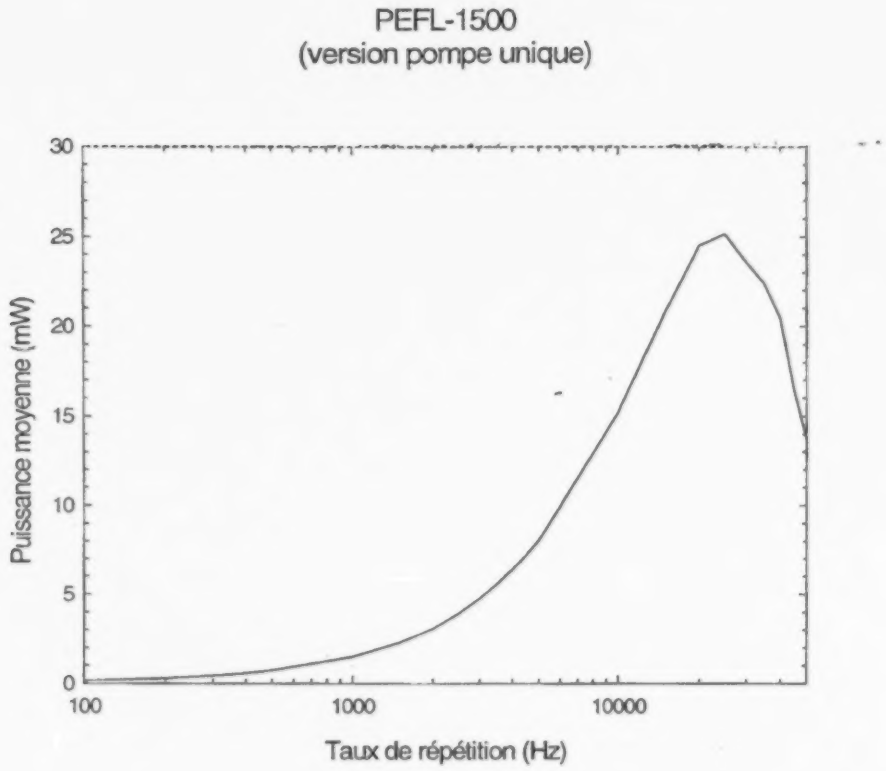

Figure 9 : Puissance moyenne du PEFL en fonction du taux de répétition

On remarque sur le graphique de l'énergie (Figure 8) que celle-ci baisse après 10kHz avec une fréquence de coupure de l'ordre de 30kHz qui correspond à puissance moyenne maximale extraite du PEFL. Comme nous le verrons à la section 5.3.5, l'émission spontanée semble très faible pour l'expérience et l'observation de l'intensité du signal entre deux impulsions confirme cette observation (Figure 10). En effet, si on réduit le taux de répétition à 5kHz, on observe une croissance de l'émission spontanée qui indique la présence d'un excédent de gain. La dynamique du pompage est visible par le délai d'environ 100µs avant la croissance de l'ASE. Si on pilote le laser à 10kHz, il y a peu d'augmentation du plancher entre les impulsions. Pour n'avoir aucune augmentation, le délai inter-impulsions doit être de 40µs pour un taux de 25kHz qui est en fait le point d'extraction maximale de puissance.

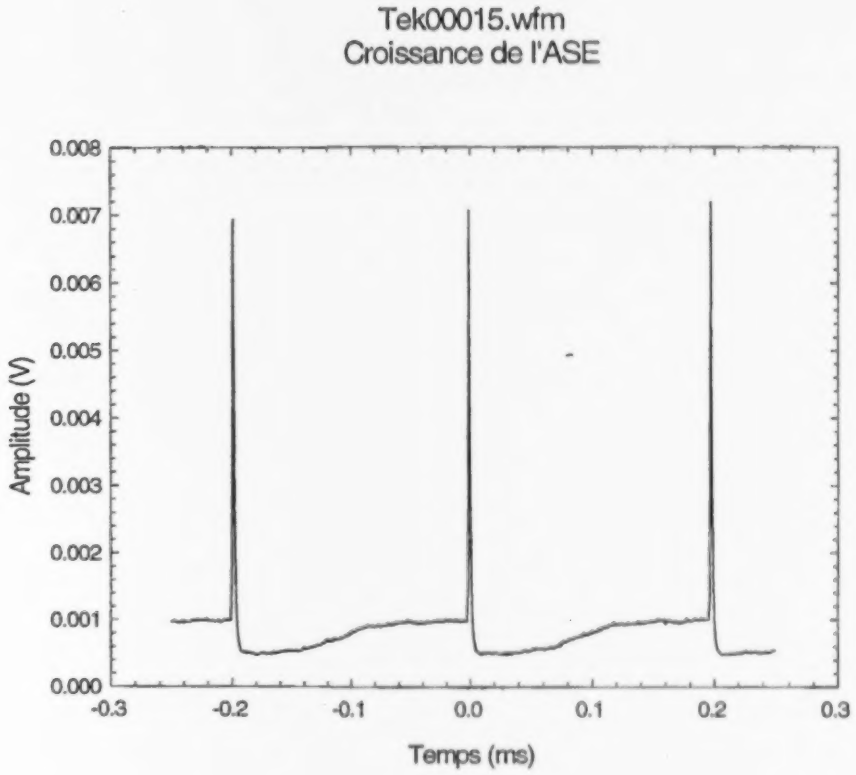

Figure 10 : Croissance de l'ASE entre deux impulsions

Pour éviter la saturation par ré-injection, le bout de sortie de la fibre amplificatrice est clivée à angle grâce à l'outil York. Pour obtenir un certain angle, une légère torsion est appliquée à la fibre sous tension, puis la lame vibrante vient induire une propagation de fissure. En général, la surface est plane avec l'angle voulu mais la face peut aussi présentée un relief non plan et déformer le profil de mode. De plus, l'efficacité d'injection peut du même coup varier beaucoup. Une fois le montage et la source caractérisés, les fibres dopées utilisées vont être décrites à la section suivant.

4.3 Description des fibres

Suite à la revue de littérature, le design optimum possède une ouverture numérique faible sans confinement. Initialement, trois fibres étaient prévues à partir de la même préforme avec des diamètres de 15, 20 et 25 microns. Des problèmes d'étirement ont fait que la fibre de 25 microns n'a pas été réalisée. Pour compenser, deux autres fibres de l'INO vont être mesurées, soit une version monomode à 1530

nm (10 microns de diamètre) et une version très multimode (30 microns de diamètre).

Tableau 1

	530A3	530C1	530C3	533E2
Type de fibre	Er/Al/P	Er/Al/P	Er/Al/P	Er/Al/P/Ge
Diamètre du cœur (μm)	10	15	20	30
Ouverture numérique	0.13	0.12	0.12	0.19
Concentration Er/Al (% wt)	0.25/3.6	~0.2/3.0	~0.2/3.0	0.27/ 3.33
Confinement de l'erbium	non	non	non	66% du diamètre
Nombre de mode calculé à 1530nm	~1	3	5	>25
Absorption 1532 (dB/m)	45	25	17.5	30
Nombre de mode calculé à 980nm	2	9	15	>65
Absorption 980nm (dB/m)	18	12	8.8	16

5. RÉSULTATS

Les résultats sont présentés en fonction du diamètre croissant des fibres et regroupent les mesures d'injection, de stabilité modale, de polarisation et d'énergie selon la disponibilité des mesures. Il va de soi que la mesure est destructrice car on écourte la fibre par section de 50cm pour trouver la longueur optimale pour la puissance de pompe disponible.

5.1 Fibre 530A3 (Ø=10μm)

Cette fibre est monomode transverse avec deux modes de pompe. L'énergie à la saturation devrait être meilleure qu'une fibre dopée typique pour un amplificateur de télécommunication.

5.1.1 Efficacité d'injection

Longueur de fibre	Puissance laser (W)	Puissance à la sortie (W)
50 cm	1.1	.40
27 cm	1.1	.40

$$\eta = \frac{0.4}{1.1} * \frac{100\%}{88.4\%} = 38\%$$

5.1.2 Énergie en fonction de la longueur

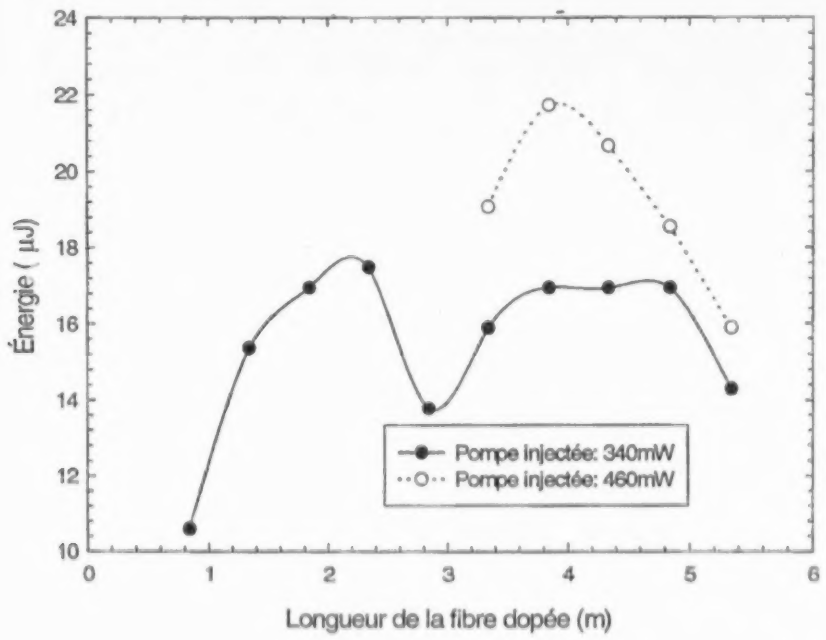

Figure 11 : Énergie en sortie pour fibre 530A3

La courbe à fort pompage est incomplète en raison de problèmes avec le laser pompe lors de cette expérience particulière.

5.1.3 Données à la longueur optimale

Pompage (mW)	Longueur optimale (m)	Joulemètre (µJ)	Puissance (mW)	Énergie*10kHz (mW)
340	2.34	19	183	185
460	3.84	22	267	217

Si on calcule la conversion de la puissance de pompe en signal on obtient 54% pour 340mW et 47% pour 460mW. La valeur maximale théorique est de 980/1530nm soit 64%.

5.2 Fibre 530C1 (Ø=15μm)

Cette fibre est le premier étirement de la préforme fabriquée pour l'expérience d'ALOAS. La préforme initiale a été coupée en trois sections, la première étant étirée directement pour la fibre 530C1.

5.2.1 Efficacité d'injection

Longueur de fibre (cm)	Puissance laser (W)	Puissance à la sortie (W)
50	1.30	.60
25	1.30	.64

$$\eta = \frac{0.64}{1.30} * \frac{100\%}{88.4\%} = 66\%$$

5.2.2 Énergie en fonction de la longueur

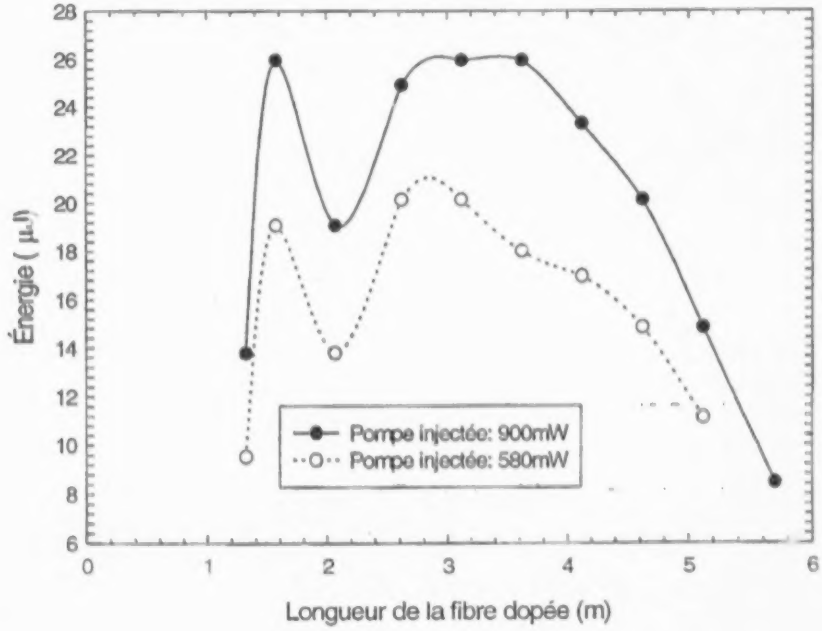

Figure 12 : Énergie en sortie pour fibre 530C1

5.2.3 Données à la longueur optimale

Pompage (mW)	Longueur optimale (m)	Joulemètre (μJ)	Puissance (mW)	Énergie*10kHz (mW)
580	2.75	20	335	201
900	3.50	26	442	260

Le facteur de conversion de puissance de pompe vers le signal est de 35% pour 580mW et de 29% pour 900mW. Cependant, les valeurs de puissances pour cette fibre sont incomplètes et moins fiables car la puissance du laser pompe variait beaucoup entre les deux types de mesure (énergie et puissance).

5.2.4 Effet du mélangeur de modes

Avec cette fibre, le mélangeur ne produit plus d'effet mesurable sur l'énergie de sortie. Si on serre trop, l'énergie commence à diminuer.

5.3 Fibre 530C3 (Ø=20μm)

Deuxième fibre mais troisième étirement car le second n'a pas donné de bon résultat. Pour cet étirement, la préforme initiale a été dégrossie pour maintenir un diamètre extérieur de 125 microns tout en augmentant le diamètre du cœur. Cependant, une bonne partie du tube de silice de base a été enlevée et le verre de cette fibre est beaucoup plus mou et la température d'étirement est notablement plus basse d'où le problème au second étirement. Comme la fibre de 25 microns devait servir surtout à la comparaison avec Desthieux[2] , une seconde tentative avec l'étirement à 20 microns a été préférée.

5.3.1 Efficacité d'injection

Longueur de fibre (cm)	Puissance laser (W)	Puissance à la sortie (W)
50	1.18	.67
25	1.45	.84

$$\eta = \frac{0.84}{1.45} * \frac{100\%}{88.4\%} = 66\%$$

5.3.2 Énergie en fonction de la longueur

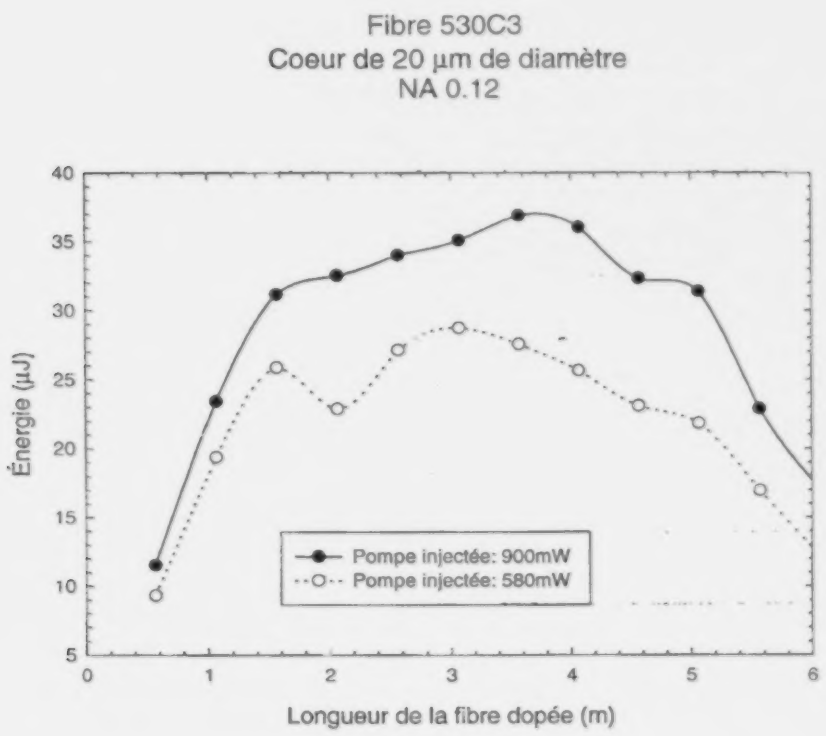

Figure 13 : Énergie en sortie pour fibre 530C3

5.3.3 Données à la longueur optimale

Pompage (mW)	Longueur optimale (m)	Joulemètre (µJ)	Puissance (mW)	Énergie*10kHz (mW)
580	3.07	29	302	287
900	3.57	37	393	369

Si on calcule la conversion de la puissance de pompe en signal on obtient 49.5% pour 580mW et 41% pour 900mW.

5.3.4 Effet du mélangeur de modes

Pour un amplificateur trop long, on note une augmentation de l'énergie d'environ 5% à un point de serrage optimum et en champ lointain, le mode semble

qualitativement un peu plus gros. Si on serre trop, l'énergie diminue. Cependant, pour la longueur optimale, le mélangeur ne produit plus d'effet.

5.3.5 Polarisation du signal

On place un cube polarisant devant le détecteur ILX sur une monture qui lui permet de tourner. On mesure le minimum et le maximum avec signal et sans signal (émission spontanée).

Source	Sans polariseur	Maximum	Minimum	Somme	Ratio
Signal	244mW	214.4mW	23.1mW	237.5mW	9.3 :1
ASE	46mW	21.8mW	22.0mW	43.8mW	1 :1

On constate que l'émission spontanée n'est pas polarisée alors que le signal lui passe par un maximum et un minimum avec un rapport de 9 à 1. Si on manipule la fibre avec le polariseur installé, on note que la puissance est très variable ce qui témoigne d'un couplage des modes de polarisation.

5.3.6 Effet d'une faible amplification sur la forme temporelle

Cette mesure provient de l'amplificateur alors qu'il n'était pas à la longueur optimale. La différence par rapport à l'optimum est de 1.5m d'où le gain plus faible.

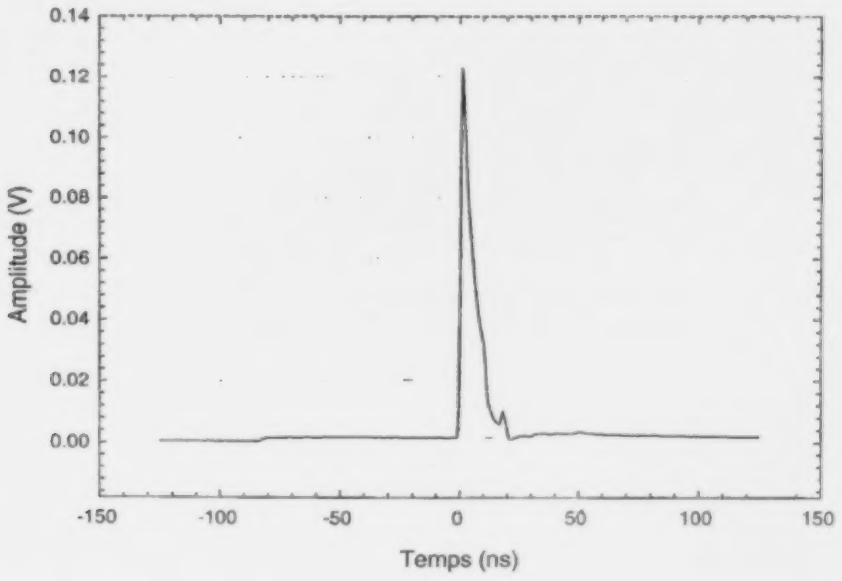

Figure 14 : Forme temporelle de l'impulsion après faible amplification

L'intégrale totale englobe tout le signal, alors que celle du piédestal se termine à 0.0ns (Figure 17). On mesure aussi l'intégrale sans le pied à partir de 0.0ns.

Position	Pied	Sans pied	Somme	Total
Intégrale	0.145nV•sec	0.975nV•sec	1.12nV•sec	1.12nV•sec

L'énergie contenue dans le piédestal représente 12.9% du total. On note ici une augmentation du pied comparativement au laser seul. Le piédestal voit le milieu de gain tout de suite après la récupération due au pompage. Pour cette partie de l'impulsion, le gain est maximum.

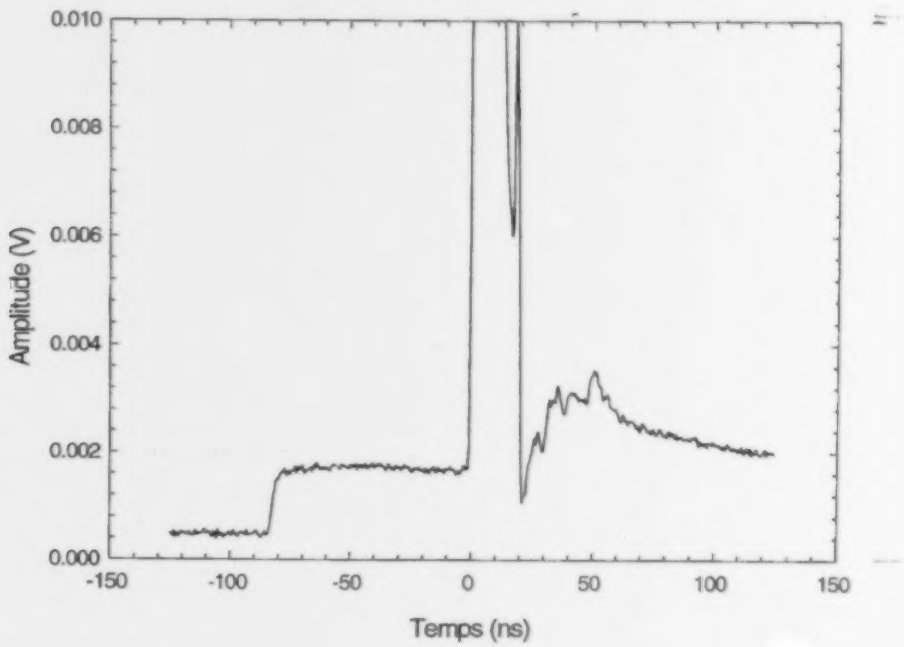

Figure 15 : Forme du piédestal après faible amplification

5.3.7 Effet d'une forte amplification sur la forme temporelle

Les mesures suivantes ont été prises à la longueur optimale qui donne le maximum d'énergie et ce pour le pompage maximum.

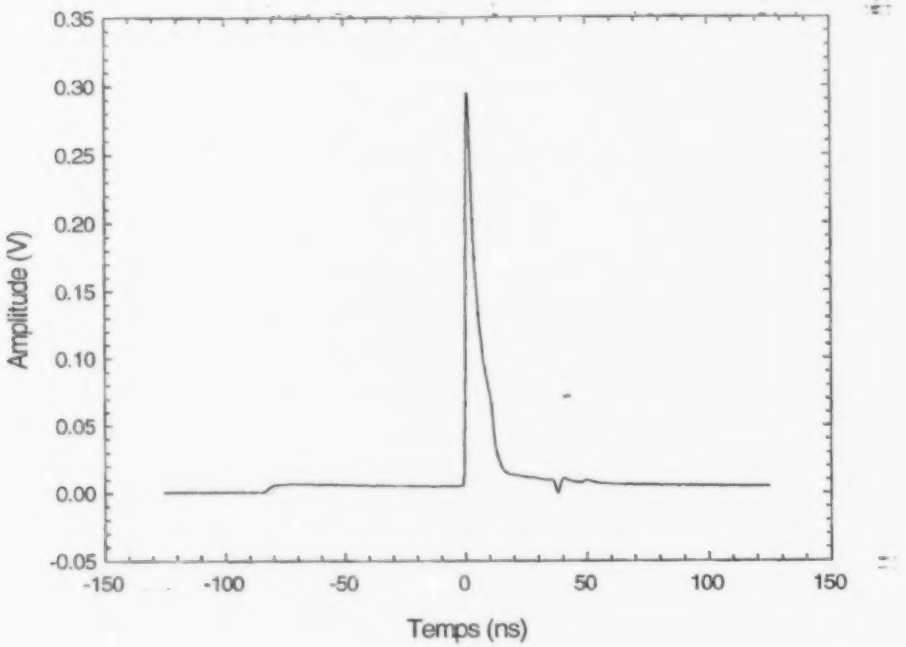

Figure 16 : Forme temporelle de l'impulsion fortement amplifiée

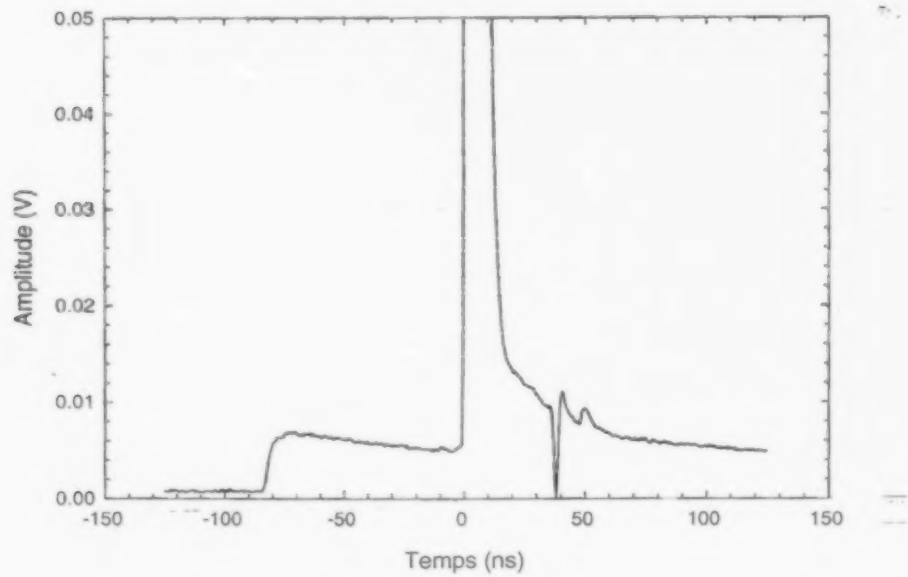

Figure 17 : Piédestal de l'impulsion fortement amplifiée

Comme pour le cas précédent, l'intégrale totale englobe tout le signal, alors que celle du piédestal se termine à 0.0 ns (Figure 17). On mesure aussi l'intégrale sans le pied à partir de 0.0 ns.

Position	Pied	Sans pied	Somme	Total
Intégrale	0.52nV•sec	2.83nV•sec	3.35nV•sec	3.35nV•sec

L'énergie contenue dans le piédestal représente 15.5% du total. On constate même que le front montant du piédestal commence à subir plus de gain que le reste du pied.

5.3.8 Effet de l'amplificateur sur le temps de montée

Le temps de montée de l'impulsion de la source est d'environ de 2.2ns. Après amplification maximale, la largeur de l'impulsion passe de 9nm à 4.8ns avec un temps de montée de moins de 0.8ns (limité par la combinaison détecteur – oscilloscope). Pour des applications de mesure de distance, cet effet sur le temps de montée s'avère intéressant car il augmente la résolution spatiale.

5.4 Fibre 533E2 (Ø=30µm)

Cette fibre provient d'un essai de fibre à gradient d'indice et dopée à l'erbium. Le profil après fabrication est cependant très semblable à celui d'une fibre à saut d'indice et la fibre est utilisée comme telle. L'ouverture numérique plus grande combinée au diamètre de cœur de 30µm rendent cette fibre fortement multimode.

5.4.1 Efficacité d'injection

Longueur de fibre	Puissance laser (W)	Puissance à la sortie (W)
42.5 cm	1.00	0.55
16.5 cm	0.785	0.45

$$\eta = \frac{0.45}{0.785} * \frac{100\%}{88.4\%} = 65\%$$

La tendance générale était que plus le cœur augmentait, plus l'injection de pompe était facilitée. Pour cette fibre, il semble que la limite de l'optique d'injection soit atteinte car l'amélioration par rapport à la fibre précédente est nulle.

5.4.2 Énergie en fonction de la longueur

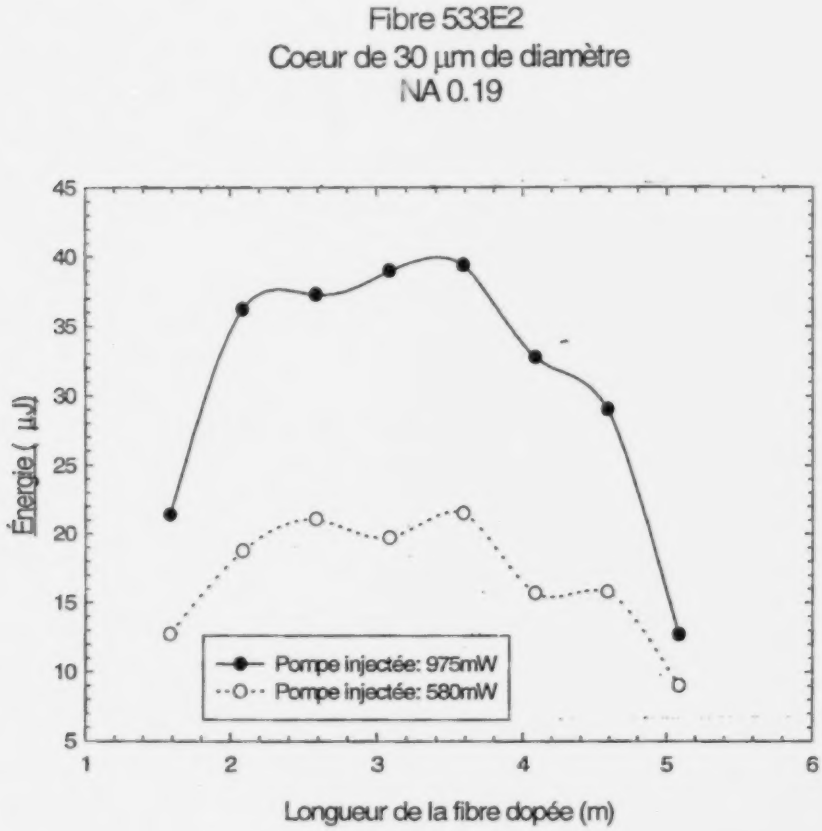

Figure 18 : Énergie en sortie pour fibre 533E2

5.4.3 Données à la longueur optimale

Pompage (mW)	Longueur optimale (m)	Joulemètre (µJ)	Puissance (mW)	Énergie*10kHz (mW)
580	3.59	22	209	215
975	3.59	39	351	390

Si on calcule la conversion de la puissance de pompe en signal on obtient 37% pour 580mW et 40% pour 975mW.

La différence d'efficacité entre les deux puissances de pompe est faible particulièrement pour la plus faible valeur. Pour une énergie de l'ordre de 20µJ, cette fibre est nettement moins intéressante. Toutefois, cette fibre permet un maximum d'énergie par impulsion.

5.4.4 Forme de l'impulsion après amplification

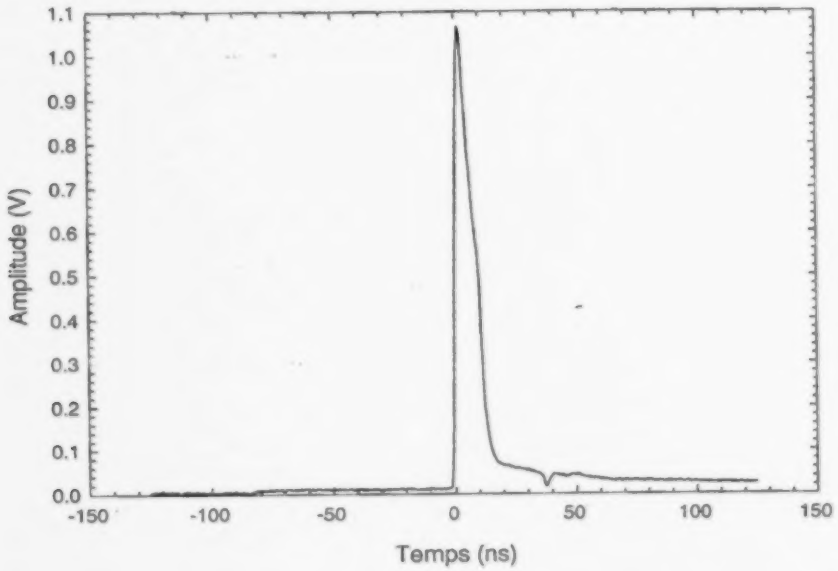

Figure 19 : Forme de l'impulsion après amplification (fibre 533E2)

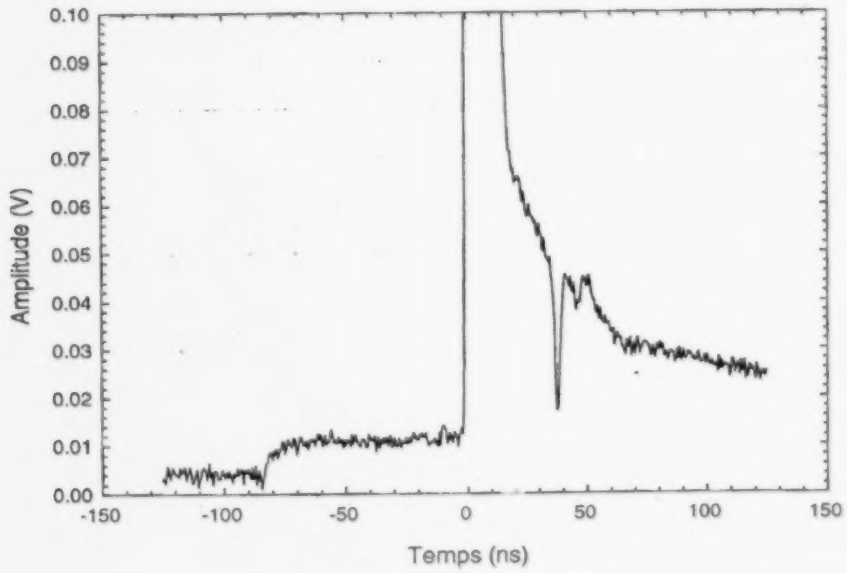

Figure 20 : Piédestal après amplification (fibre 533E2)

Cette mesure prise à la longueur optimale s'avère très intéressante. En effet, l'amplification du piédestal et la déformation de l'impulsion sont moins importantes et résultent de l'augmentation de l'énergie de saturation. L'intégrale pour ce cas n'a pas été mesurée mais si on considère le rapport du maximum du pied sur le maximum de l'impulsion, on obtient pour la fibre précédente 0.02 pour la forte amplification , 0.0125 pour la faible mais seulement 0.01 pour celle-ci.

5.4.5 Effet du mélangeur de modes

Encore ici, le mélangeur ne produit pas d'effet sur l'énergie de l'impulsion. En revanche, les profils de mode en champ lointain sont fortement affectés, comme le montre les deux profils mesurés (Figure 21 et Figure 22).

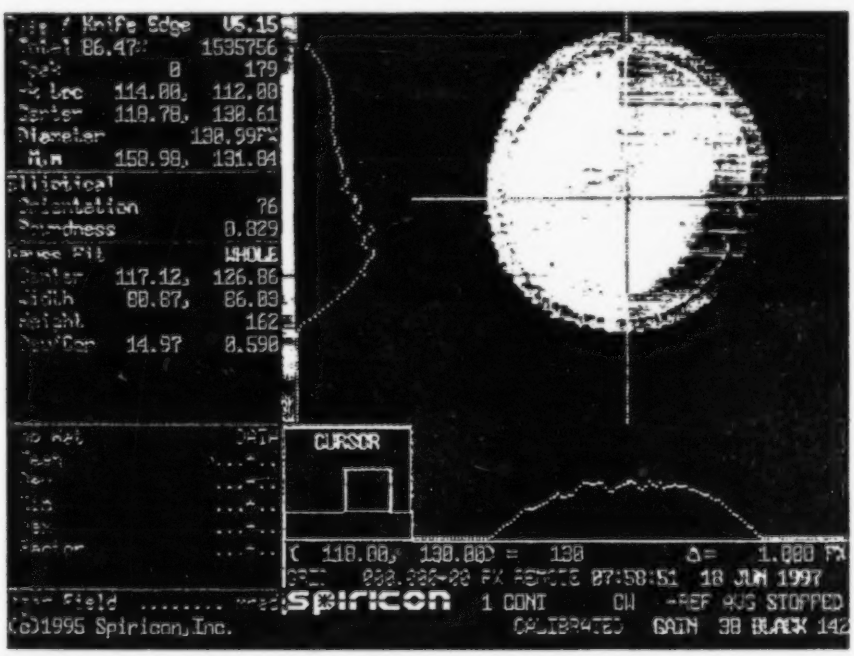

Figure 21 : Profil spatial du signal sans mélangeur de mode

Le second profil apparaît après la production de points de couplage par le serrement de la vis du mélangeur. Le profil est maintenant plus large avec une distribution moins uniforme.

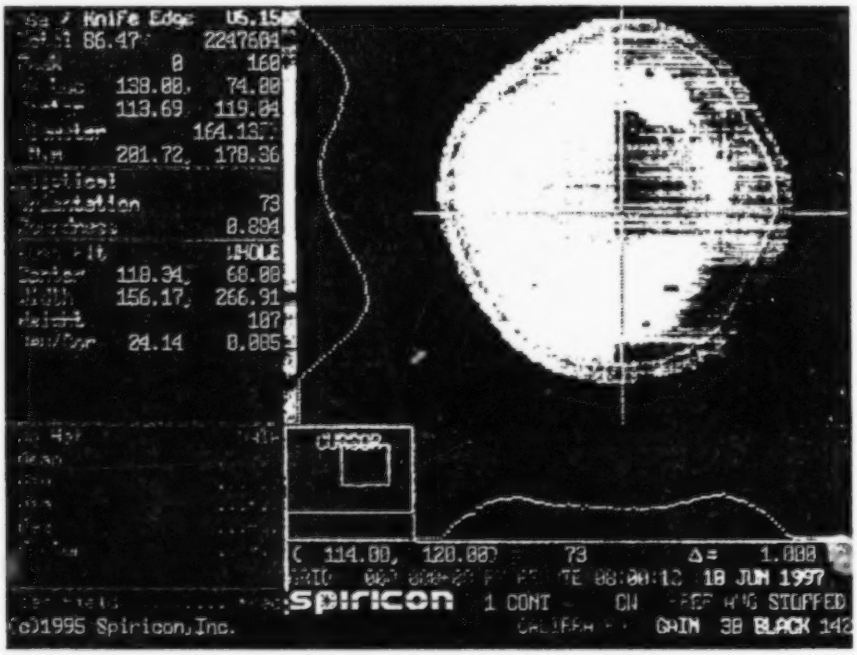

Figure 22 : Profil spatial du signal avec mélangeur

5.4.6 Profil spatial du faisceau de sortie

Pour les trois premières fibres, le profil du faisceau tel que vu sur une carte infrarouge à une certaine distance, semblait qualitativement monomode. Comme ces fibres ne guident qu'un ou quelques modes, le mode fondamental est naturellement favorisé vis-à-vis les premiers modes supérieurs de forme asymétrique. Cependant, la dernière fibre (533E2) est fortement multimode et la mesure par caméra du profil de mode s'est avérée nécessaire. Une caméra Hamamatsu C2710 et un analyseur de profil Spiricon LBA-100A furent employés pour quantifier la forme du faisceau de sortie.

Cette mesure prise à la longueur optimale s'avère très intéressante. En effet, l'amplification du piédestal et la déformation de l'impulsion sont moins importantes et résultent de l'augmentation de l'énergie de saturation. L'intégrale pour ce cas n'a pas été mesurée mais si on considère le rapport du maximum du pied sur le maximum de l'impulsion, on obtient pour la fibre précédente 0.02 pour la forte amplification , 0.0125 pour la faible mais seulement 0.01 pour celle-ci.

5.4.5 Effet du mélangeur de modes

Encore ici, le mélangeur ne produit pas d'effet sur l'énergie de l'impulsion. En revanche, les profils de mode en champ lointain sont fortement affectés, comme le montre les deux profils mesurés (Figure 21 et Figure 22).

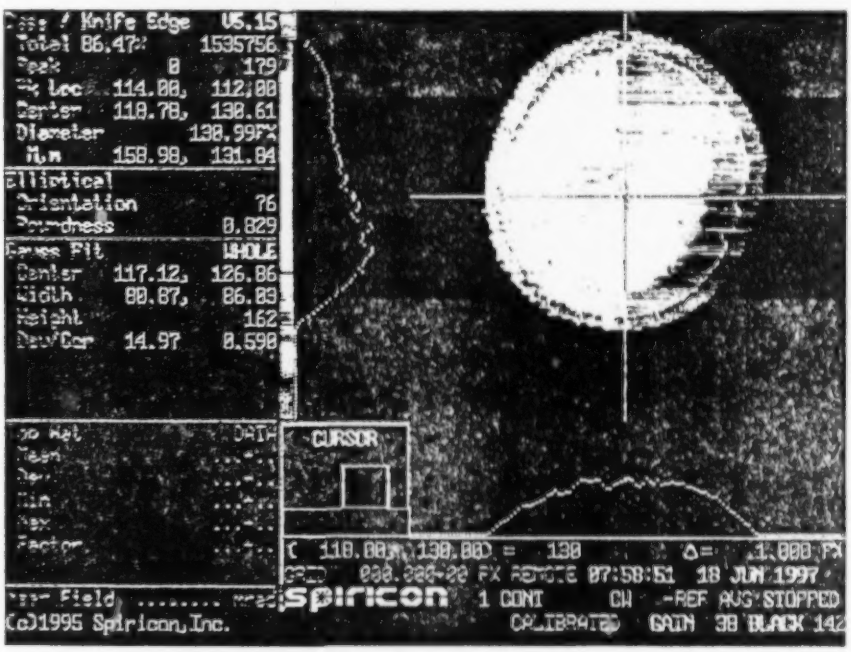

Figure 21 : Profil spatial du signal sans mélangeur de mode

Le second profil apparaît après la production de points de couplage par le serrement de la vis du mélangeur. Le profil est maintenant plus large avec une distribution moins uniforme.

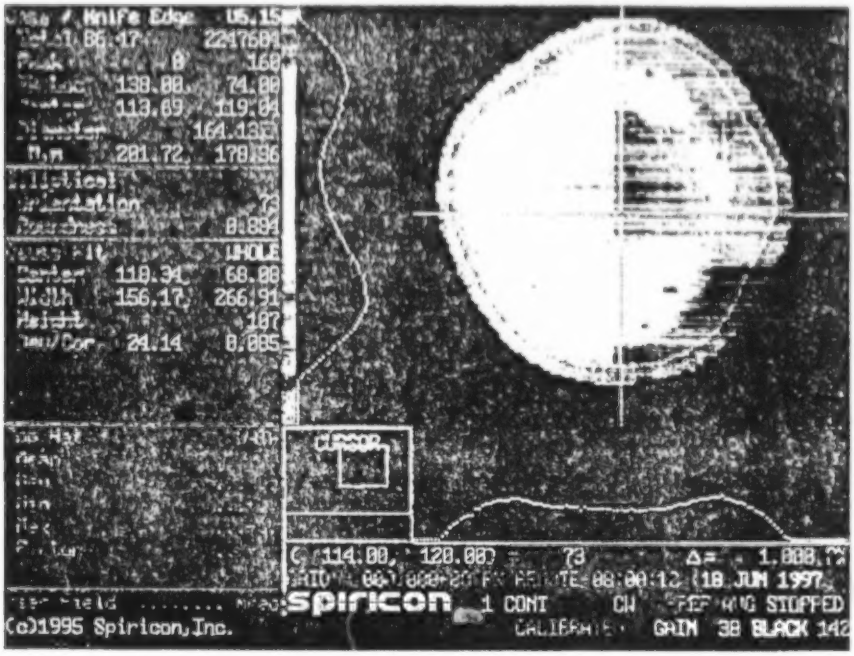

Figure 22 : Profil spatial du signal avec mélangeur

5.4.6 Profil spatial du faisceau de sortie

Pour les trois premières fibres, le profil du faisceau tel que vu sur une carte infrarouge à une certaine distance, semblait qualitativement monomode. Comme ces fibres ne guident qu'un ou quelques modes, le mode fondamental est naturellement favorisé vis-à-vis les premiers modes supérieurs de forme asymétrique. Cependant, la dernière fibre (533E2) est fortement multimode et la mesure par caméra du profil de mode s'est avérée nécessaire. Une caméra Hamamatsu C2710 et un analyseur de profil Spiricon LBA-100A furent employés pour quantifier la forme du faisceau de sortie.

5.4.6.1 Différence de profil entre le signal et l'émission spontanée

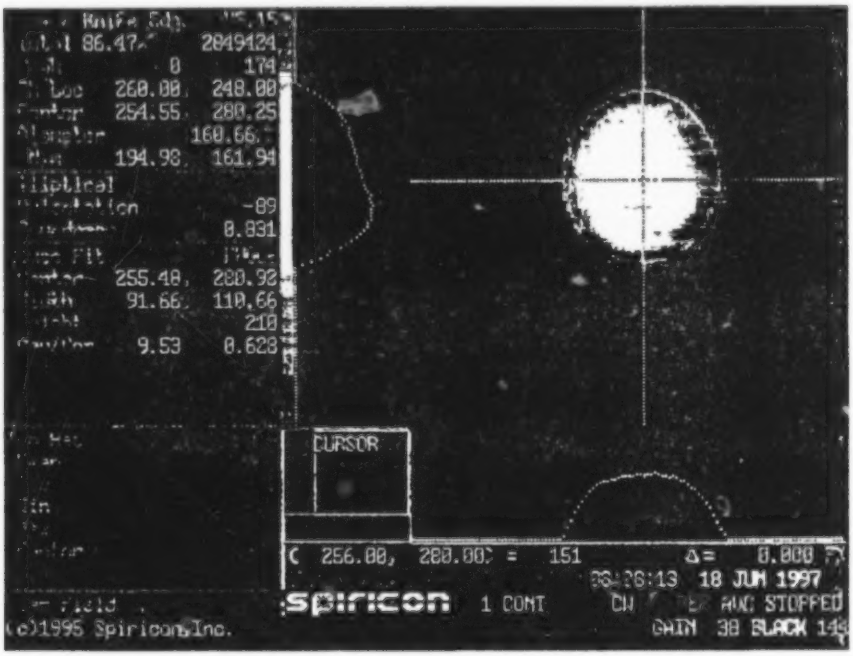

Figure 23 : Profil du signal amplifié

Le profil injecté dans l'amplificateur est issu d'une fibre monomode. Lors de la fusion, les deux fibres sont alignées et il est raisonnable de croire qu'un nombre limité de mode est excité. Le premier profil provient de la fibre amplificatrice de longueur optimum, pompé à 1.5W (Figure 23). La distribution spatiale n'est pas gaussienne et légèrement asymétrique mais assez régulière. L'asymétrie est surtout dans un axe tout comme l'angle de la clive. Suite à cette mesure, on coupe le signal incident et on observe le profil de l'émission spontanée.

Ce nouveau profil, contrairement au premier est assez asymétrique autant dans un axe que dans l'autre. L'émission spontanée originant de la fibre est captée par la grande ouverture numérique de la fibre et amplifiée. Dans ce cas, il n'y a pas de modes préférentiels si ce n'est que du guidage par le gain qu'expérimentent les modes plus au centre de la fibre. L'asymétrie verticale dans le bas du faisceau semble être commune au signal et à l'ASE. Pour vérifier l'effet du procédé de clivage, on reprend la préparation du bout de la fibre.

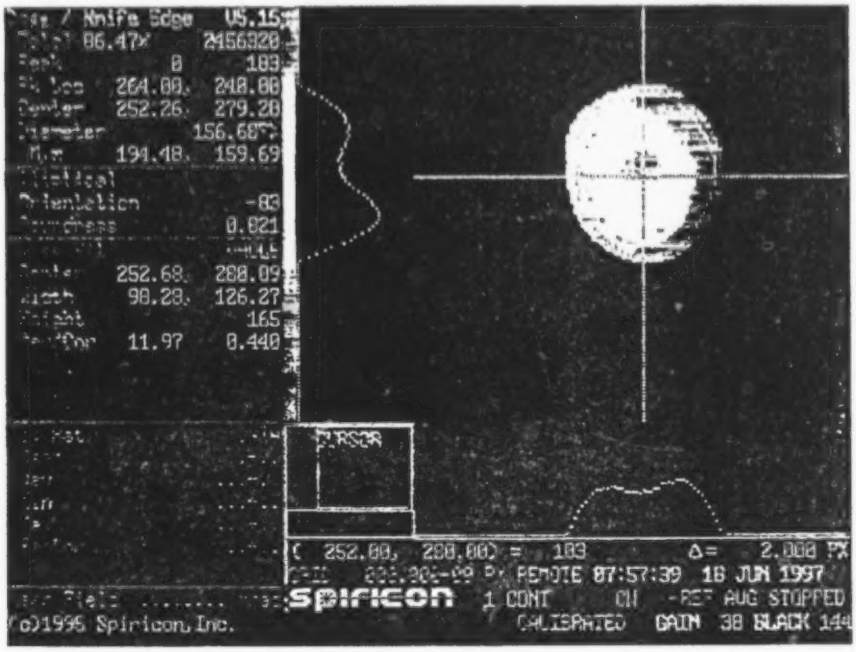

Figure 24 : Profil de l'émission spontanée

5.4.6.2 Effet de la qualité de la clive

On reprend la mesure du signal cette fois avec la nouvelle clive. Le niveau de pompage est le même et la longueur de l'amplificateur ne diffère que par le retranchement de 1cm nécessaire pour refaire la clive. Naturellement, pour refaire la clive, la fibre est démontée du support, puis replacée. L'injection est aussi refaite. Le profil modal (Figure 25) n'est pas sans rappeler celui d'une fibre à gradient d'indice et après vérification, la fibre 533E2 se voulait justement être une telle fibre. Les dépôts successifs ont trop diffusé par rapport au design visé et la fibre s'approche donc plus d'un profil carré. Le profil de l'émission spontanée (Figure 26) a également bénéficié de la nouvelle clive probablement à cause de l'effet d'une meilleure injection de pompe. En effet, pour le montage expérimental, la pompe entre par la face de sortie du signal. Une face non-uniforme disperse spatialement dans les modes supérieurs la puissance de pompe et influence ainsi la génération de l'ASE qui dépend de la distribution transverse de l'inversion de population.

5.4.6.1 Différence de profil entre le signal et l'émission spontanée

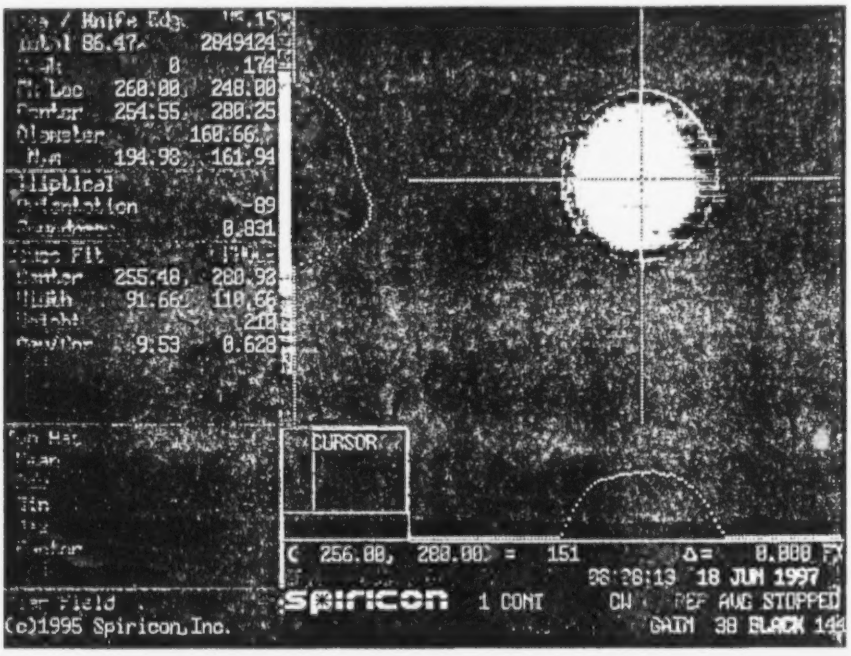

Figure 23 : Profil du signal amplifié

Le profil injecté dans l'amplificateur est issu d'une fibre monomode. Lors de la fusion, les deux fibres sont alignées et il est raisonnable de croire qu'un nombre limité de mode est excité. Le premier profil provient de la fibre amplificatrice de longueur optimum, pompé à 1.5W (Figure 23). La distribution spatiale n'est pas gaussienne et légèrement asymétrique mais assez régulière. L'asymétrie est surtout dans un axe tout comme l'angle de la clive. Suite à cette mesure, on coupe le signal incident et on observe le profil de l'émission spontanée.

Ce nouveau profil, contrairement au premier est assez asymétrique autant dans un axe que dans l'autre. L'émission spontanée originant de la fibre est captée par la grande ouverture numérique de la fibre et amplifiée. Dans ce cas, il n'y a pas de modes préférentiels si ce n'est que du guidage par le gain qu'expérimentent les modes plus au centre de la fibre. L'asymétrie verticale dans le bas du faisceau semble être commune au signal et à l'ASE. Pour vérifier l'effet du procédé de clivage, on reprend la préparation du bout de la fibre.

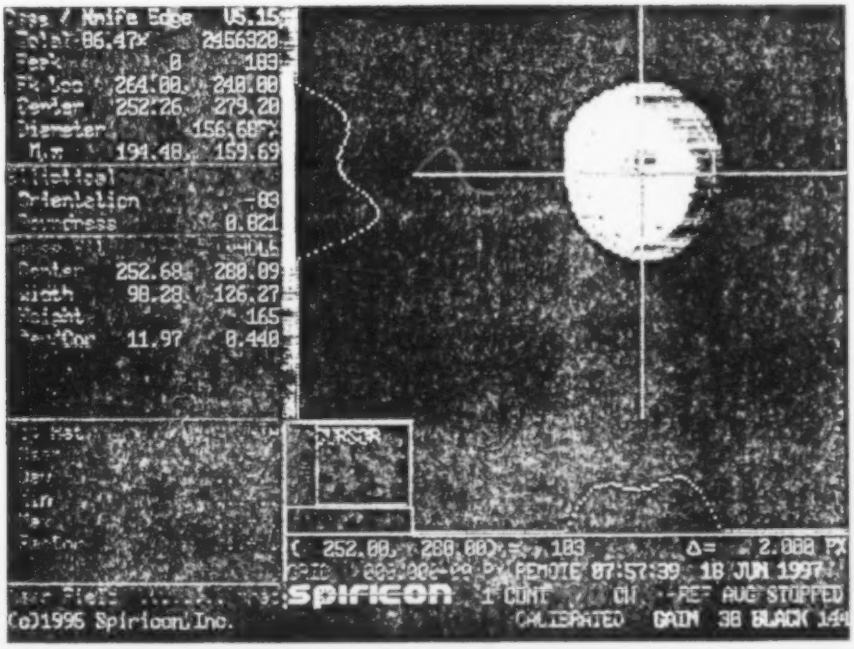

Figure 24 : Profil de l'émission spontanée

5.4.6.2 Effet de la qualité de la clive

On reprend la mesure du signal cette fois avec la nouvelle clive. Le niveau de pompage est le même et la longueur de l'amplificateur ne diffère que par le retranchement de 1cm nécessaire pour refaire la clive. Naturellement, pour refaire la clive, la fibre est démontée du support, puis replacée. L'injection est aussi refaite. Le profil modal (Figure 25) n'est pas sans rappeler celui d'une fibre à gradient d'indice et après vérification, la fibre 533E2 se voulait justement être une telle fibre. Les dépôts successifs ont trop diffusé par rapport au design visé et la fibre s'approche donc plus d'un profil carré. Le profil de l'émission spontanée (Figure 26) a également bénéficié de la nouvelle clive probablement à cause de l'effet d'une meilleure injection de pompe. En effet, pour le montage expérimental, la pompe entre par la face de sortie du signal. Une face non-uniforme disperse spatialement dans les modes supérieurs la puissance de pompe et influence ainsi la génération de l'ASE qui dépend de la distribution transverse de l'inversion de population.

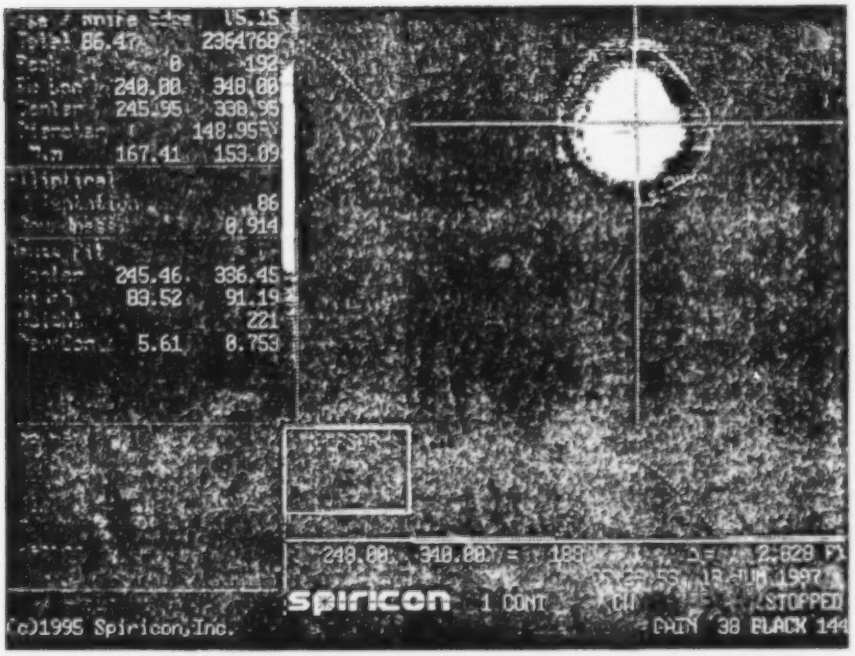

Figure 25 : Profil signal avec nouvelle clive

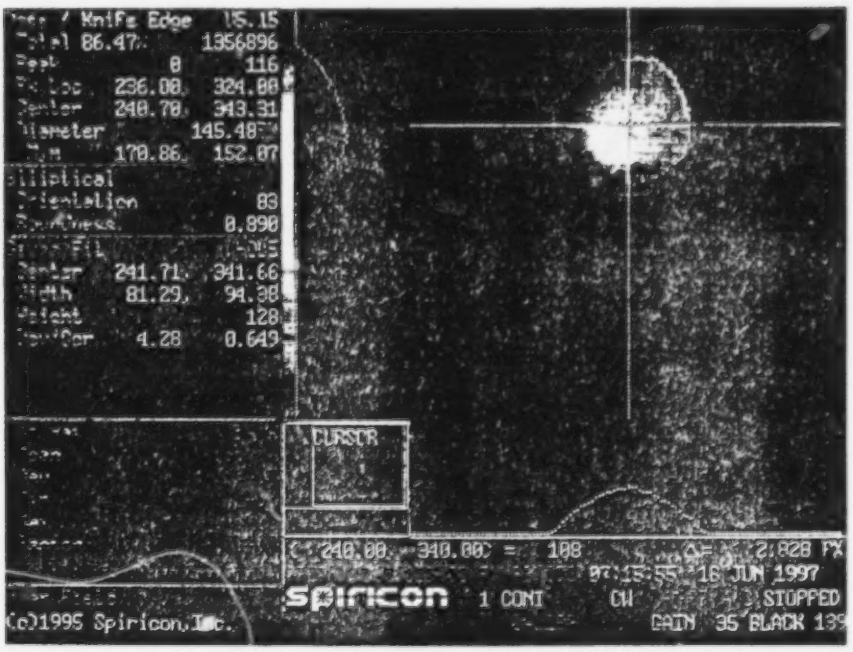

Figure 26 : Profil ASE avec nouvelle clive

Le profil mesuré d'ASE est plus évasé mais tout comme le profil du signal, il est relativement uniforme dans les deux axes.

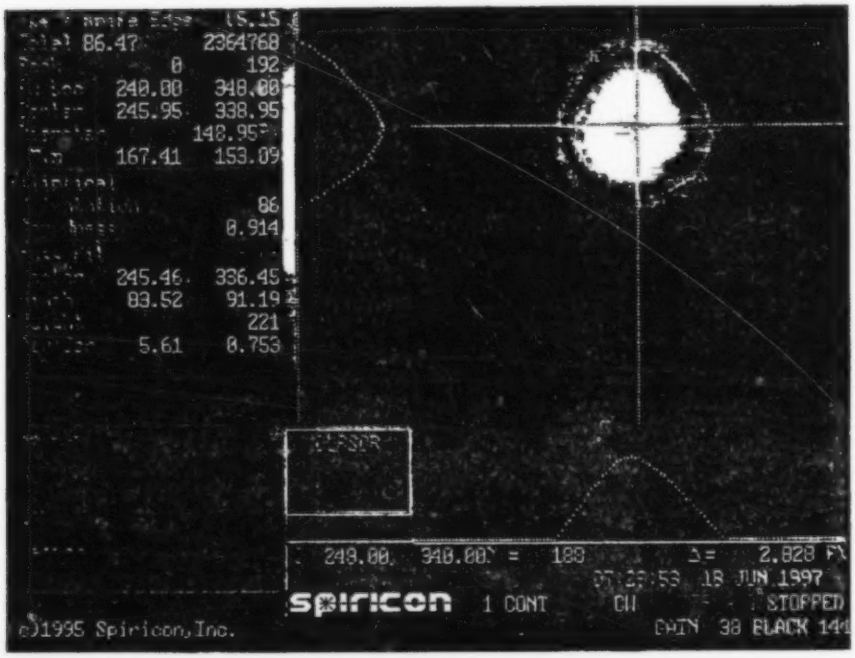

Figure 25 : Profil signal avec nouvelle clive

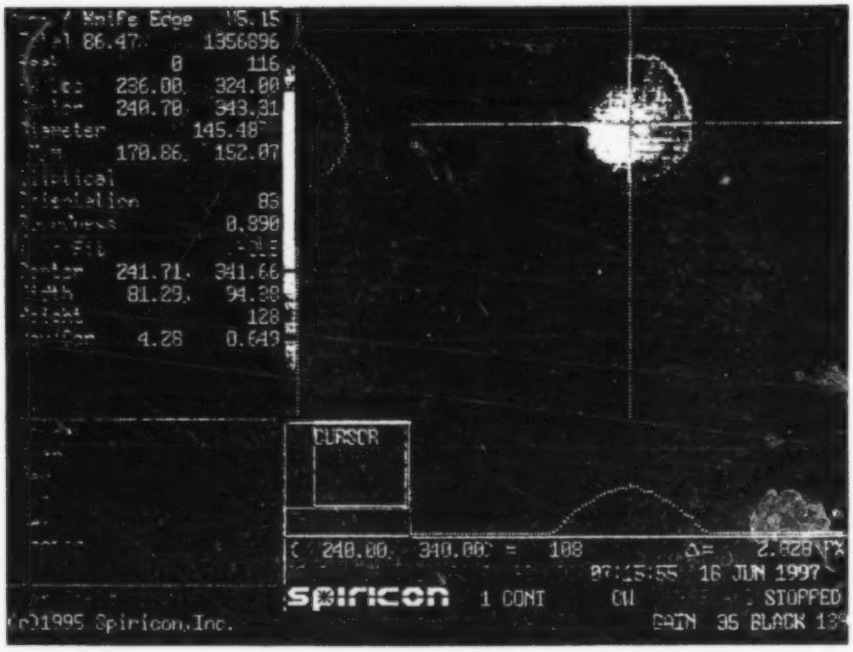

Figure 26 : Profil ASE avec nouvelle clive

Le profil mesuré d'ASE est plus évasé mais tout comme le profil du signal, il est relativement uniforme dans les deux axes.

5.4.7 Polarisation du signal

On place un cube polarisant avant le détecteur ILX sur une monture qui lui permet de tourner. On mesure le minimum et le maximum avec signal et sans signal (émission spontanée).

Source	Sans polariseur	Maximum	Minimum	Somme	Ratio
Signal	182mW	114mW	60mW	174mW	2 :1
ASE	89mW	Pas de différence		N/D	1 :1

On constate que l'émission spontanée, comme pour les autres fibres, n'est pas polarisée alors que le signal l'est légèrement suivant un rapport de 2 à 1.

6. ÉVOLUTION DE LA FORME TEMPORELLE DE L'IMPULSION SUIVANT LES FIBRES

Dans cette section, on s'attarde à l'évolution de la forme de l'impulsion suivant le niveau d'amplification et le type de fibre. Le signal incident de 9-10ns présente une forme un peu gaussienne avec un sommet aplati (Figure 27). Idéalement, la forme visée est une impulsion carrée mais les temps de montée de l'électronique de modulation adoucissent les fronts d'onde. La bosse après l'impulsion est produite par un écho dans le câble coaxial.

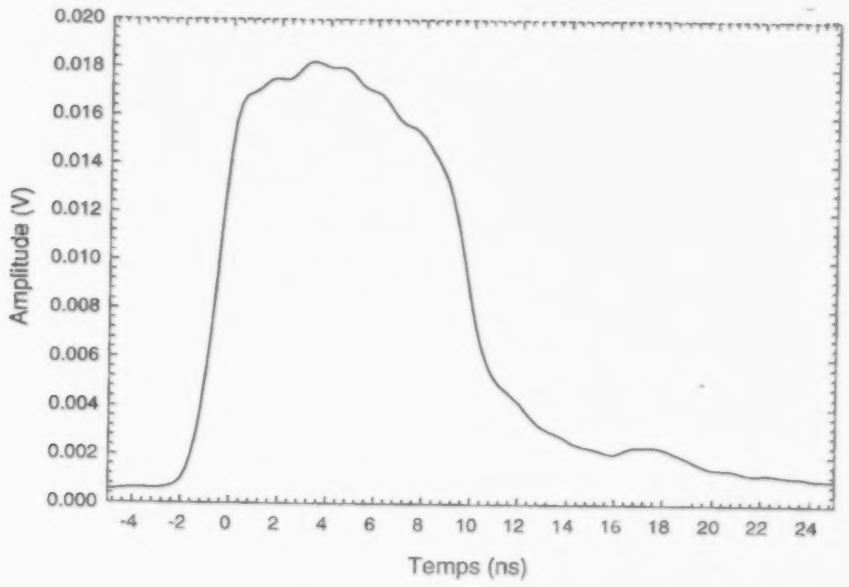

Figure 27 : Forme temporelle de l'impulsion initiale

6.1 Effet du gain sur la forme de l'impulsion

Pour deux sections de fibre (une longueur légèrement plus courte que l'optimum et l'autre nettement trop courte), on mesure la forme de l'impulsion à un pompage de 1W. L'impulsion pour la fibre courte reçoit peu de gain (8dB) et on note déjà le front montant plus raide ainsi que la forme décroissante après le maximum. Avant le front descendant de l'impulsion, l'amplitude est déjà réduite de plus de 50%. La largeur à mi-hauteur est encore de 10ns.

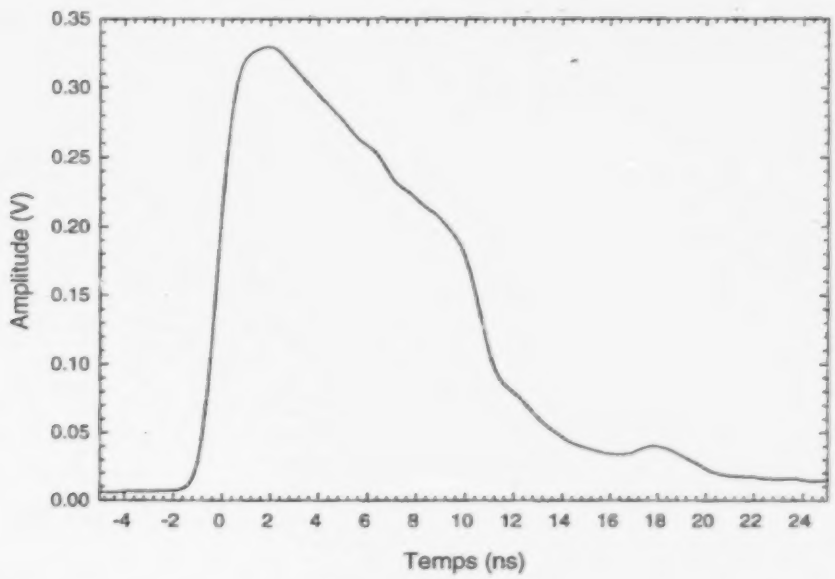

Figure 28 : Forme temporelle après faible amplification (fibre 530A3)

La seconde mesure de l'amplificateur pour un gain de 15dB montre un temps de montée très court avec un sommet très pointu. Cette fois, la décroissance atteint près de 70% à la fin de l'impulsion. La largeur à mi-hauteur est réduite à 7ns et la décroissance après le maximum donne un aspect plus acéré à la forme d'onde.

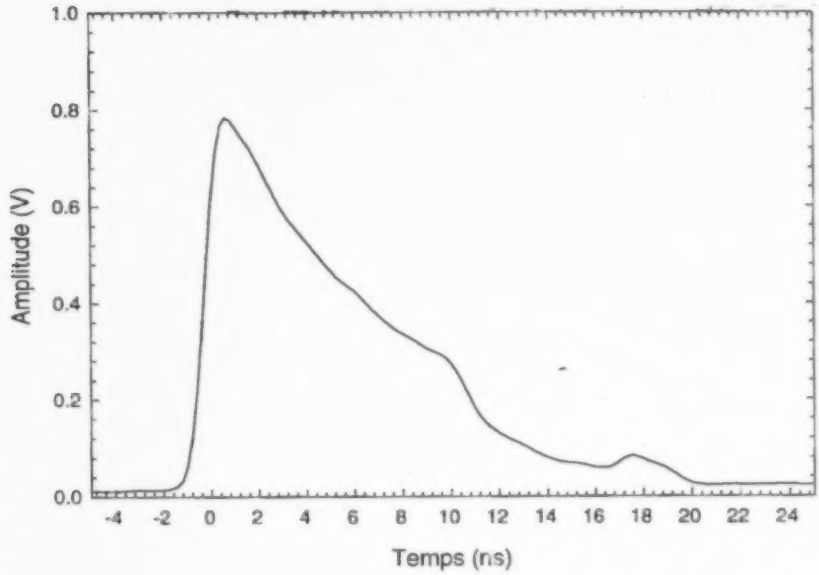

Figure 29 : Forme temporelle après forte amplification (fibre 530A3)

6.2 Forme temporelle d'impulsions longues après amplification

Le même amplificateur basé sur la fibre 530A3 de 10 microns de diamètre de cœur nous a permis de vérifier l'effet de l'allongement de l'impulsion incidente sur la forme de l'impulsion de sortie. La longueur de fibre utilisée est la même que pour la forte amplification de la section précédente pour comparaison avec la Figure 29.

Même si on double la largeur de l'impulsion à 19ns, la puissance crête diminue légèrement mais l'impulsion présente la même forme avec une décroissance exponentielle qui continue cette fois un peu plus loin. La largeur à mi-hauteur est d'environ 8ns soit la même que pour l'impulsion de 10ns. L'énergie totale (aire sous la courbe) est un peu plus grande ce qui témoigne d'une meilleure extraction d'énergie. À ce point, il y a encore un gain sur l'énergie sans trop perdre de puissance crête.

Alors, il est intéressant de poursuivre en portant la largeur de l'impulsion à 43ns, en doublant encore, pour quantifier le gain supplémentaire d'énergie.

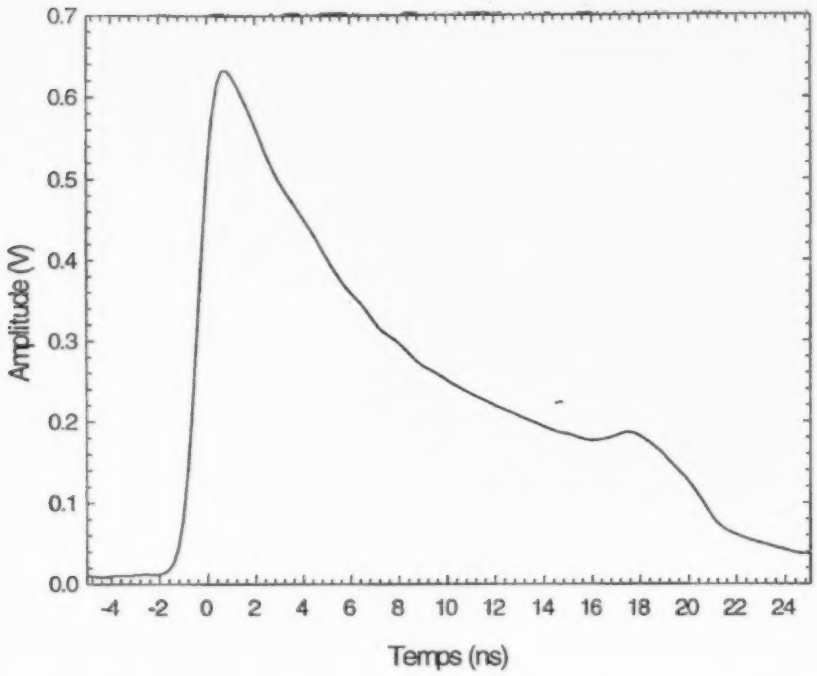

Figure 30 : Forme temporelle de l'impulsion de 19ns (fibre 530A3)

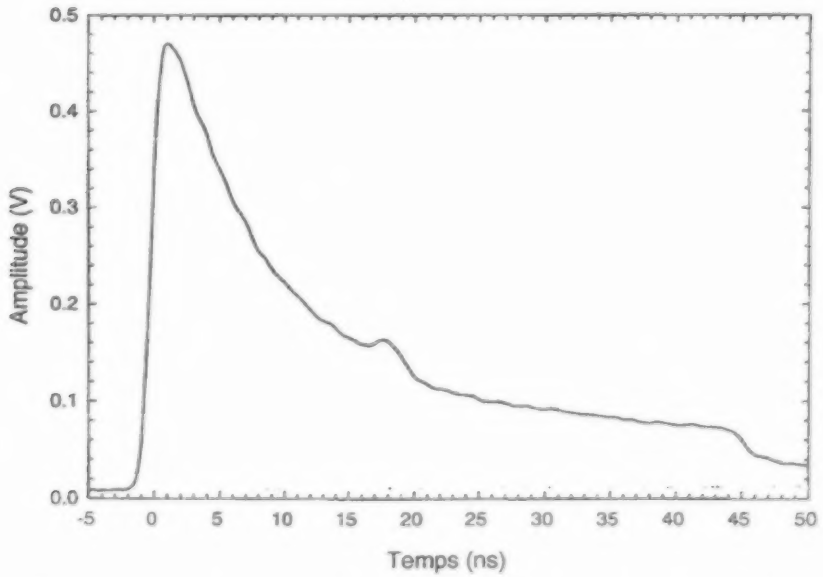

Figure 31 : Forme temporelle de l'impulsion de 43ns (fibre 530A3)

Si on considère la forme de l'impulsion amplifiée, l'utilité d'une telle largeur est assez marginale car la forme n'est que le prolongement de l'exponentielle décroissante de 10 et 19ns et la puissance crête est encore plus faible. La largeur à mi-hauteur est encore de 8ns. Cette fois, le gain d'énergie est marginal.

6.3 Forme temporelle en fonction du type de fibre

Pour les fibres 530A3 (10µm), 530C3 (20µm) et 533E2 (30µm), les formes d'impulsion temporelles après amplification sont comparées. Seules les données de la fibre de 530C1 (15 µm) manquent.

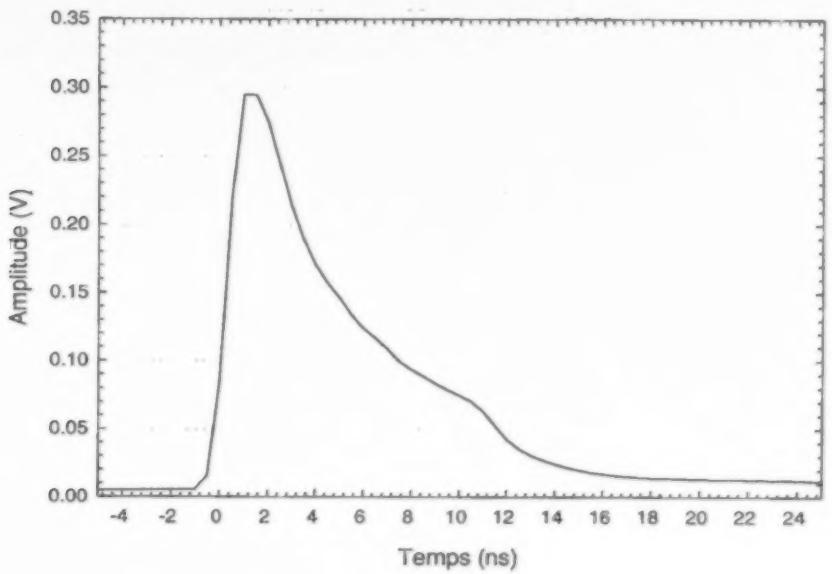

Figure 32 : Forme temporelle après amplification (fibre 530C3)

La forme temporelle à la sortie de la fibre monomode 503A3 se compare à celle de la fibre multimode de 20 microns avec une décroissance légèrement plus prononcée. La largeur à mi-hauteur pour la fibre 530C3 est plus étroite à 5ns. Quant à la fibre fortement multimode 533E2, l'effet de décroissance est nettement moins prononcé et la largeur à mi-hauteur n'est pratiquement pas affectée (environ 9ns).

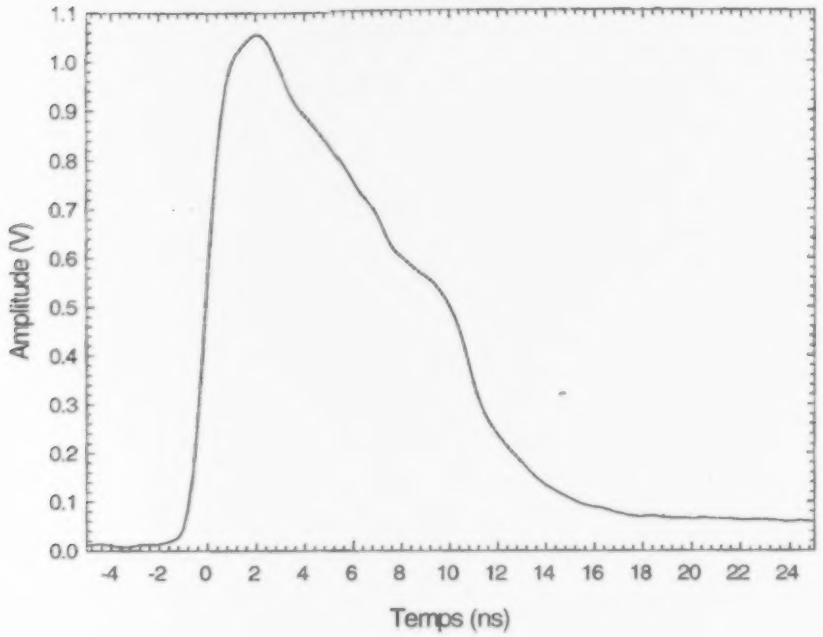

Figure 33 : Forme temporelle après amplification (fibre 533E2)

7. CONCLUSION

L'utilisation du PEFL comme source de signal pour un amplificateur simplifie grandement le montage. De plus, la longueur d'onde et le profil spectral du PEFL sont stables. Le laser offre aussi la possibilité d'intégrer dans le futur l'amplificateur de puissance à même le boîtier.

Les fibres qui ont une valeur de U_{sat} élevée donnent plus d'énergie en partie parce que l'injection est meilleure. De plus, la fibre fortement multimode déforme moins l'impulsion car l'énergie emmagasinée est plus grande. Dépendamment de la fibre, les caractéristiques de polarisation de la source sont conservées par l'amplificateur mais avec une détérioration du rapport d'extinction plus ou moins marquée. Pour une énergie au voisinage de 20µJ-30µJ, une fibre monomode à faible ouverture numérique ou même la fibre 530A3 donne de bons résultats sans problème de variation de profil modal.

Le front montant de l'impulsion incidente voit le maximum de gain et se trouve plus amplifié que le reste de l'impulsion. Ce qui fait que le temps de montée de l'impulsion diminue. Le majorité du gain est épuisé dans la première dizaine de nanosecondes et le reste de l'impulsion suit une décroissance exponentielle. Ainsi la différence entre des impulsions de 10, 19 ou 43ns est relativement faible (Section 6), les impulsions longues n'étant que le prolongement de la pente de l'impulsion courte.

La face de sortie de la fibre amplificatrice résiste bien à la puissance crête de plusieurs kilowatts (2000-5000W) et aucun bris de face n'est à rapporter pour les quatre fibres et ce, malgré la qualité variable de la clive à angle. Comme prévu, une clive droite (aucun angle) produit un retour important de 4% qui sature le gain et réduit de plus de 58% l'énergie donnée à l'impulsion. Enfin, la qualité de la face de sortie est importante pour la forme spatiale du faisceau de sortie. Présentement, la face à angle est réalisée à partir d'un clivage à angle par torsion mais le polissage de type APC serait préférable pour en assurer l'uniformité.

Le profil modal ainsi que l'énergie sont stables pour la fibre fortement multimode même si on la manipule, mais on induit par contre, un fort mélange de la polarisation. Si on insère par exemple un polariseur, ce mélange de polarisation se traduit par une forte variation d'intensité. Cette polarisation résiduelle, si elle tourne lors de la propagation dans la fibre, combinée à l'utilisation d'une lame séparatrice à angle est peut-être à l'origine des modulations de l'énergie de sortie en fonction de la longueur de l'amplificateur.

8. RECOMMANDATIONS

Du point de vue pratique, l'amplificateur utilisé comporte peu de pièces et pour obtenir 30µJ, la puissance de pompe est raisonnable soit de l'ordre de 600-900mW. Le boîtier OEM du PEFL (10x11x16 cm^3) abrite trois cartes électroniques et une carte optique. Avec l'utilisation de composants en montage de surface pour l'électronique, l'espace dégagée pourrait accueillir les composants optiques supplémentaires.

8.1 Aspects critiques

Cependant, pour compléter adéquatement cette étude de faisabilité, certains aspects critiques devront être considérés avant de conclure :

- Un de ces aspects est la faisabilité d'injection de suffisamment de puissance de pompe dans l'amplificateur. Des diodes pompes non injectées fiables de 1-2W sont commercialement disponibles et une étude théorique de l'injection dans une fibre de 15 et 20µm est nécessaire. Cette étude confirmerait si une pompe de 1W est possible ou si on doit considérer deux pompes de 500mW. Cet aspect intervient directement dans le volume de l'appareil, sa consommation électrique et sa dissipation thermique.

- L'autre aspect important est la présence d'un piédestal, négligeable pour le laser source, mais non-négligeable après amplification (12-15% de l'énergie). Pour une réalisation pratique, l'énergie présente dans ce piédestal devra être réduite significativement. Ce piédestal provient de deux sources : la configuration électronique du modulateur et la longueur de la cavité optique. Il peut donc être réduit en expérimentant avec une électronique de modulation différente et avec la configuration optique de la cavité laser.

Les deux prochaines sections couvrent les travaux supplémentaires faits lors de l'amendement à la proposition pour faire suite aux deux recommandations précédentes.

8.2 Injection dans la fibre

Pour atteindre le niveau de pompage voulu, les diodes lasers disponibles sont de type à grande surface avec une région active de 1µm par 30µm et même 1µm par 100µm. Les fibres considérées dans l'étude d'ALOAS sont d'un diamètre semblable (allant vers le plus petit) à la zone d'émission de la diode laser. La méthode de couplage devient alors importante de façon à récupérer le maximum de puissance en se positionnant près du laser. Pour ce faire, l'INO a développé une méthode de

polissage de fibre lentillée hémi-cylindrique qui permet un bon couplage dans une fibre optique (Figure 34). Les simulations faites jusqu'ici considéraient uniquement l'axe rapide et une fibre suffisamment grande pour capter tout l'axe lent. Pour analyser les fibres d'ALOAS, la modélisation en deux dimensions est requise parce qu'on ne peut injecter la pleine largeur de la source laser.

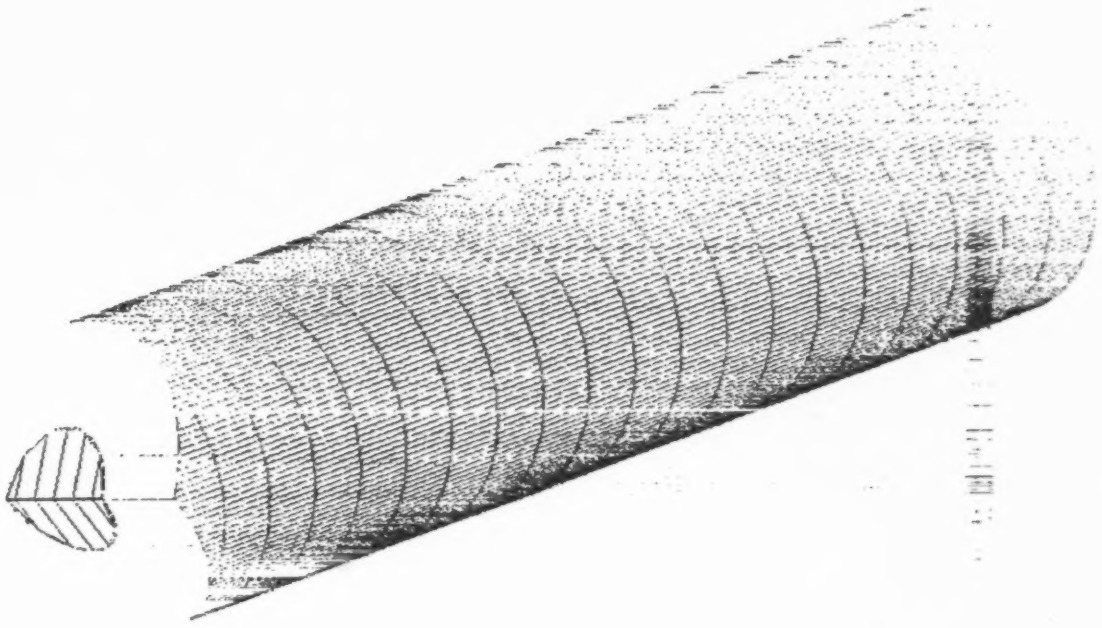

Figure 34: Fibre lentillée

8.2.1 Modélisation:

A. Fibre optique

Les fibres optiques utilisées sont celles répertoriées au tableau 1. Comme caractéristique supplémentaire, les fibres sont clivées à angle pour un meilleur couplage dans l'axe rapide. Le modèle (représenté à la Figure 34) permet de varier la taille de la fibre, l'ouverture numérique et l'angle de clive.

B. Diode laser haute puissance

La source de puissance utilisée est une diode laser de puissance à 980 nm de 1 X 30 µm de dimension. Nous avons alors à modéliser une source présentant un très large astigmatisme avec des divergences et des profils donnés. L'axe rapide est de forme gaussienne avec une divergence de 30° (FWHM). L'axe lent est généralement de forme « top-hat » avec une divergence de 11° (FWHM). La Figure 35 montre le profil simulé en champ proche de la diode. Ce champ nous semble représenter une approximation raisonnable du champ réel. Il est généré à partir de l'image d'une source gaussienne rendue moins astigmatique à l'aide d'une lentille.

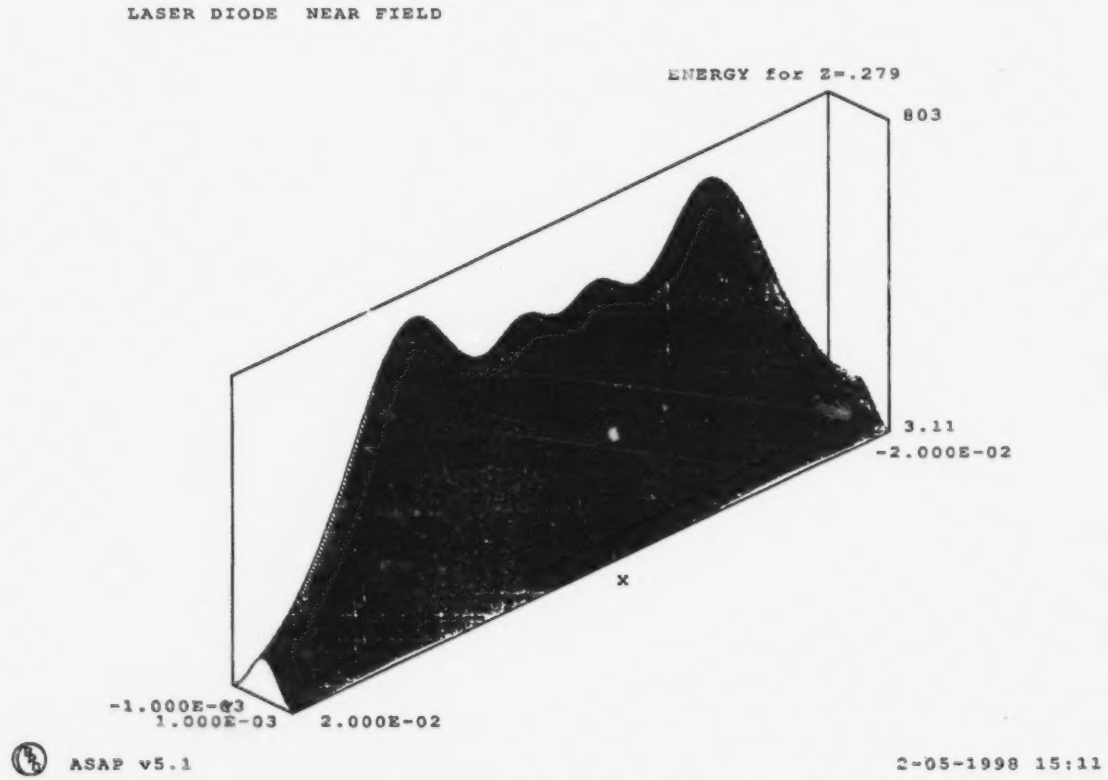

Figure 35: Profil spatial de la diode laser

1. Tracé de rayons avec ASAP

L'analyse a été effectuée avec ASAP (Advanced Systems Analysis Program). ASAP est un logiciel de « raytracing » qui permet de faire des calculs exacts d'énergie. Cette technique est valide pour une analyse de couplage dans des fibres multimodes, mais sa précision change en fonction du nombre de mode. Pour les plus petites fibres d'ALOAS, le coefficient de couplage est plutôt à titre indicatif. Avec un nombre suffisant de rayons, nous pouvons déterminer

précisément l'efficacité de couplage ou la fraction d'énergie de la puissance totale de la diode qui est couplée dans la fibre. Les Figure 36 et Figure 37 nous montrent le tracé de rayons pour les deux axes principaux. Nous pouvons voir également comment la source a été générée devant la fibre.

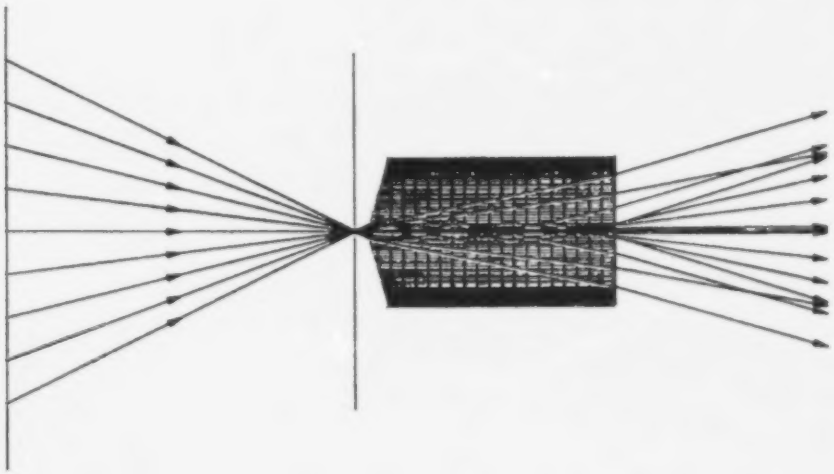

Figure 36: Tracé des rayons (axe rapide)

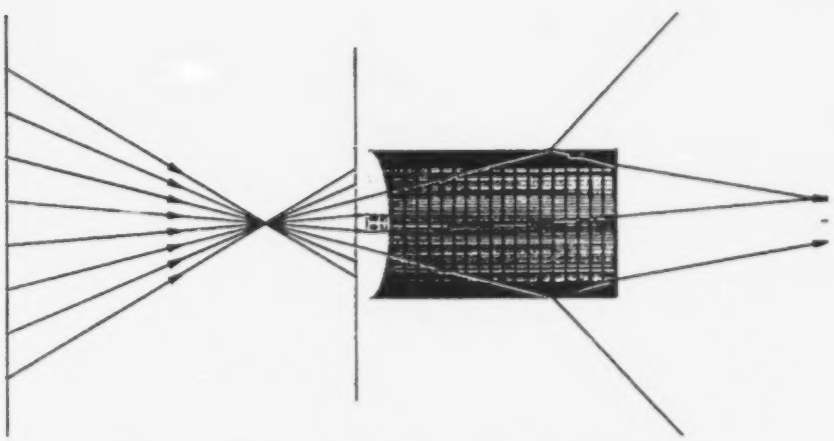

Figure 37: Tracé des rayons (axe lent)

8.2.2 Résultats

Le tableau 2 résume les résultats des couplages pour les différentes fibres en mentionnant également les tolérances. dz, dy et dx représentent les tolérances mécaniques (position) occasionnant une perte de 1dB du couplage.

Tableau 2

Description de la fibre	Couplage (%)	dz (0.5dB)	dx (1dB)	dy (1dB)
Diamètre du cœur : 50 µm N.A. : 0.19	**57.0** z=10 µm, θ=20°	± 10 µm	± 15 µm	± 2 µm
Diamètre du cœur : 30 µm N.A. : 0.19 (533E2)	**46.0** z=10 µm, θ=20°	± 10 µm	± 8 µm	± 2 µm
Diamètre du cœur : 20 µm N.A. : 0.12 (530C3)	**21.0** z=10 µm, θ=20°	± 8 µm	± 3 µm	± 1 µm
Diamètre du cœur : 15 µm N.A. : 0.12 (530C1)	**12.0** z=10 µm, θ=20°	± 8 µm	± 5 µm	± 2 µm

8.2.3 Conclusion sur le couplage

Les résultats montrent qu'une fibre avec un cœur de moins de 30 µm ne permet pas un très bon couplage. Néanmoins, les tolérances d'alignement sont très acceptables pour tous les cas. Nous notons également que l'angle de clive n'est pas très critique, le couplage étant maximisé à 5% près sur une plage d'environ 10 à 15°. Le couplage est amélioré d'un facteur 2 (environ) avec l'approche de la clive comparativement à la fibre seule.

Si on utilise une diode de 1.0 à 1.5W (1X30µm) et la fibre de 30µm, la puissance injectée pourrait être de l'ordre de 450-650mW. Le laser PEFL devrait alors utiliser une configuration à double pompe. Comme ces pompes sont alimentées en série, la consommation électrique ne changerait pas significativement mais l'espace requis augmente un peu. Cette approche est simple et mène le plus directement au prototype 20-30µJ mais offre peu de latitude pour des améliorations futures. C'est pourquoi, une évaluation des alternatives est suggérée comme première étape avant la réalisation du prototype.

8.3 Réduction du piédestal

Le piédestal du PEFL-1500 provient d'une fuite d'émission spontanée lors de l'ouverture du modulateur interne pour la formation de l'impulsion. La durée du piédestal correspond en fait au temps d'aller-retour de l'impulsion dans la section de génération. La longueur totale dans cette section est de 8 mètres de fibre incluant les fibres amorces et la fibre amplificatrice. Le délai est donc d'environ :

$$\tau_d = \frac{2nL}{c} \qquad \textbf{Équation 4}$$

avec c= vitesse de la lumière, n= l'indice de réfraction de la fibre et L=8m longueur de la cavité ce qui donne environ 80ns.

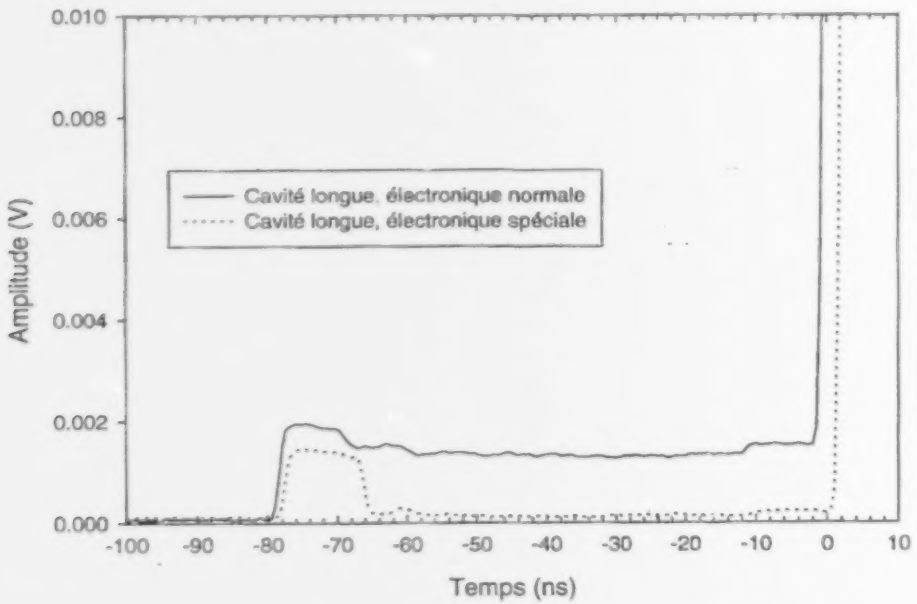

Figure 38 : Effet de l'électronique sur la forme du piédestal

Le trait plein représente le laser tel qu'utilisé pour les essais d'amplification. Avec la modification de l'électronique de contrôle du modulateur interne, il est possible de refermer le modulateur le temps de la construction de l'impulsion. Le modulateur n'est donc ouvert que pour la durée de l'impulsion ce que l'on peut voir en trait pointillé. L'énergie contenue dans le piédestal passe alors de 3% à moins de

0.4%. Ce précurseur pourrait aussi bien être éloigné de l'impulsion que rapproché en modifiant la longueur du parcours. Les fibres amorces des composants optiques dans la cavité ont été raccourcies de 2 mètres pour valider la deuxième approche de réduction du piédestal.

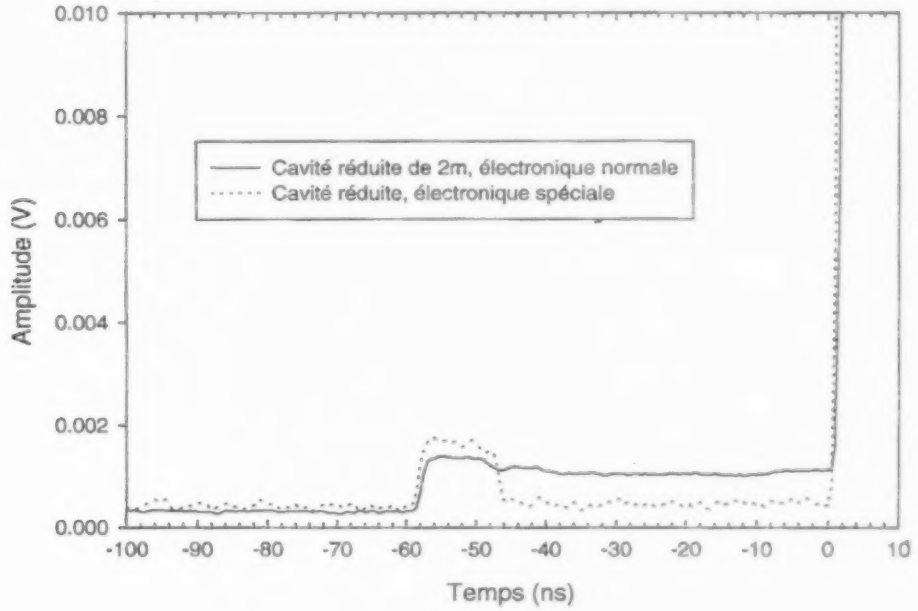

Figure 39 : Réduction du piédestal en modifiant la cavité optique

La cavité étant plus courte de 2m, la durée de l'impulsion est donc diminuée de 20ns et ramenée à un total de 60ns. En trait plein, l'énergie sous le piédestal est réduite de 3% à 2%. Potentiellement, dans un design final, les amorces pourraient être encore réduites de 2 mètres pour un piédestal de 40ns avec 1.5% de l'énergie. On remarque aussi en pointillé pour l'électronique modifiée, que le précurseur (toujours de 10ns) est plus près du front montant de l'impulsion.

Suite à cette démonstration, une ou l'autre solution fonctionne comme prévue et selon le design du système d'acquisition, l'approche qui pertube le moins pourra être implantée.

8.4 Vérifications secondaires

Certaines publications mentionnent l'apparition d'énergie dans la région spectrale comprise entre 1600-1700nm due à l'effet Raman. Cependant, ceci se produit surtout à faible taux de répétition avec grande énergie et haute puissance crête. Il serait pertinent surtout avec une fibre monomode de quantifier l'effet Raman. Bien que l'énergie par impulsion soit la même suite à un transfert Raman, la réponse spectrale du détecteur, elle, est très différente entre 1530 et 1650nm. Cette vérification de la génération de Raman avec analyse spectrale est aussi pertinente si on pense utiliser une fibre de distribution à la sortie de l'amplificateur. Avec une fibre de 500m et une impulsion de 3.5μJ, il semble que lors d'une expérience effectuée antérieurement à l'INO, on ait vu une perte de signal sur un détecteur rapide au Germanium alors qu'un joulemètre donnait une bonne lecture. Nous croyons qu'un transfert d'énergie Raman vers les longueurs d'onde 1600nm pourrait expliquer le phénomène. Donc, même à plus faible énergie, l'effet semble présent pour une certaine longueur de fibre.

Lors des expériences, la face de sortie n'a jamais subi de dommage mais pour chaque clive, les mesures ont duré une heure au maximum. Nous recommandons donc une vérification de la robustesse de la face de sortie en fonction d'une puissance crête plus élevée et sur une période plus longue. Cependant, sur un dispositif de champ, la face de sortie sera vraisemblablement protégée à l'intérieur du télescope de collimation.

9. BIBLIOGRAPHIE

1. Nilsson J. and Jaskorzynska B., "Modeling and optimization of low-repetition-rate high-energy pulse amplification in cw-pumped erbium-doped fiber amplifiers", Optics Lett., 18, 24, pp. 2099-2101, 1993.

2. Desthieux B., Laming R. I. and Payne D.N., "111 kW (0.5mJ) pulse amplification at 1.5μm" , Appl. Phys. Lett., 63, 5, pp. 586-588, 1993.

3. Galvanauskas A., "Compact Ultrahigh-Power Laser System", Proc. SPIE 2377, pp. 117-126, 1995.

4. Lees G.P., Hartog A., Leach A. and Newson T.P., "980nm diode pumped erbium^{3+}/ytterbium^{3+} doped Q-switched fibre laser", Electron. Lett. ,31 ,21 , pp. 1836-1837, 1995

5. Lees G.P., Taverner D., Richardsib D.J., Dong L. and Newson T.P., "Q-switched erbium doped fibre laser utilising a novel large mode area fibre", Electron. Lett., 33, 5, pp. 393-394

6. Mears R.J., Reekie L., Poole S. B. and Payne D.N., "Low-threshold tunable CW and Q-switch fibre laser operating at 1.55 mm", Electron. Lett., 22, 3, pp. 159-160, 1986.

7. Myslinski P., Chrostowski J., Koningstein J.A. and Simpson, J.R., "High power Q-switched erbium doped fiber laser", IEEE J. Quantum Electron., 28, 1, pp. 371-377, 1992

8. Seguin F. and Oleskevich T., "Diode-pumped Q-switched laser", Opt. Engineering, 32, 9, pp. 2036-2041, 1993.

9. Sejka M., Poulsen C.V., Povlsen J. H., Shi Y. and Poulsen O., "High Repetition Rate Q-Switched Ring Laser in Er^{3+}-Doped Fiber", Optical Fiber Technology, 1, pp. 167-170, 1995.

10. Taverner D., Richardson D.J., Dong L., Caplen J.E., Williams K. and Penty R.V., "158-μJ pulses from a single-transverse-mode, large-mode-area erbium-doped fiber amplifier", Optics Lett., 22, 6, pp.378-380, 1997.

11. Agrawal G. P., "Nonlinear fiber optics", Quantum Electronics, Academic Press, 1989.

12. Rafizadeh D. and Jopson R. M., "Kilowatt pulses at 1.55μm from a singlemode erbium-doped amplifier", Electron. Lett., 30, 4, pp. 317-318, 1994.

13. Taverner D., Galvanauskas A., Harter D., Richardson D.J. and Dong L., "Generation of high-energy pulses using a large-mode-area erbium-doped fiber amplifier", Proc. CLEO'96, pp. 496-497, 1996.

14. Gapontsev V. P., Fomin V. V. and Samartsev I. E., "25kW peak power, wide-tunable-repetition-rate and pulse duration eye-safe MOPFA laser", Proc. CLEO'96, pp. 209-210, 1996

15. Bjarklev A., "Optical Fiber Amplifiers: Design and System Applications", Artech House, Boston, pp 145-150, 1993

16. Siegman A. E., "Lasers", University Science Books, California, Chapter 10, 1986

17. Chandonnet A., Larose G.,"High-Power Q-Switched Erbium Fiber Laser Using An All-Fiber Intensity Modulator", Optical Engineering, Vol. 32, No. 9, pp.2031-2035, 1993